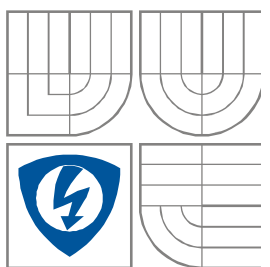


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# BEZKONTAKTNÍ PROUDOVÝ SENZOR DC A AC PROUDU NÍZKÝCH KMITOČTŮ S VYUŽITÍM WIEGANDOVA EFEKTU

CONTACTLESS WIEGAND EFFECT DC AND AC CURRENT SENSOR

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

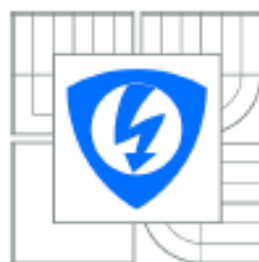
MARTIN ŠTEFÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KUBÁSEK, Ph.D.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Martin Štefánek

**ID:** 146972

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši popisující princip a použití Wiegandova efektu a senzorů pracujících na tomto principu. Navrhněte magnetický obvod pro použití Wiegandova senzoru jako senzoru proudu. Proveďte základní experimenty s Wiegandovým senzorem. Zkonstruuje prototyp senzoru proudu s využitím Wiegandova senzoru. Experimentálně ověřte jeho funkčnost. Změřte statické a dynamické parametry senzoru proudu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SAVAGE, H. T., CHEN, D. X., POLO, CH., VAZQUEZ, M., WUN-FOGLE, M. A giant Barkhausen effect with 1 second-order instability, J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (1994) 681-684.

[2] SUSUMI, A. MATSUSHITA, A., Induced Pulse Voltage in Twisted Vicalloy Wire with Compound Magnetic Effect, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 6, November 1995.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 30.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Radek Kubásek, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

V práci jsou popsány typy magnetických senzorů, které jsou používány při měření magnetických polí. Dokument je členěn do jednotlivých kapitol, ve kterých je popsán Wiegandův senzor a jeho implementace do magnetického senzoru. V dokumentu je řešen návrh magnetického obvodu pro tento senzor. Práce hodnotí postup při návrhu bezkontaktního ampérmetru, který měří střídavý i stejnosměrný proud pomocí Wiegandova efektu. Experimentální ověření principu a jeho funkce při měření stejnosměrného proudu je popsáno v předposlední kapitole.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Wiegandův drát, Magnetické senzory, Barkhausenův jev, Měření proudu

## **ABSTRACT**

The paper describes the types of magnetic sensors, which are used for measuring magnetic fields. The document is divided into chapters, which describe Wiegandův sensor and its implementation into the magnetic sensor in this document is designed magnetic circuit design for this sensor. The work evaluates the progress in the design of contactless ammeter that measures AC and DC current via Wiegand effect. Experimental verification principle and its function for DC current is described in the penultimate chapter.

## **KEYWORDS**

Wiegand wire, Magnetic sensors, Barkhausen effect, Current measurement

ŠTEFÁNEK, M. Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 51 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. ing. Radek Kubásek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. ing. Radek Kubásek, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Magnetické senzory</b>	<b>2</b>
1.1 Hallova sonda .....	2
1.2 Feromagnetická sonda ( Fluxgate ) .....	2
1.3 Feromagnetické magnetorezistory .....	2
1.3.1 Feromagnetické magnetorezistory AMR .....	2
1.3.2 Feromagnetické magnetorezistory SDT .....	2
1.3.3 Feromagnetické magnetorezistory GMR .....	3
1.4 Magnetický senzor využívající Wiegandova efektu .....	3
<b>2 Barkhausenův jev</b>	<b>6</b>
2.1 Barkhausenův jev .....	6
2.2 Pulzní generátor.....	7
2.3 Aplikace do magnetického senzoru.....	9
<b>3 Wiegandův drát</b>	<b>10</b>
3.1 Pulzní generátor s amorfními bistabilními dráty .....	10
3.2 Wiegandův drát .....	12
<b>4 Měření proudu s využitím magnetických senzorů</b>	<b>15</b>
4.1 Měření proudu klešťovým ampérmetrem.....	15
4.2 Měření střídavého proudu pomocí wiegandova senzoru.....	16
4.3 Měření stejnosměrného proudu pomocí wiegandova senzoru .....	18
<b>5 Měřicí obvod</b>	<b>19</b>
5.1 Návrh magnetického obvodu .....	19
5.2 Výpočet parametrů magnetického obvodu.....	20
5.3 Cívky navinuté na jádru a jeho mechanická stabilizace.....	23
5.3.1 Mechanická stabilizace .....	24
5.4 Tvarovač výstupního impulsu .....	24
5.4.1 Návrh v programu EAGLE .....	25

5.4.2	Simulace v programu ORCAD .....	27
5.5	Ověření funkce senzoru a magnetického obvodu.....	29
5.6	výstupní impulsy tvarovače.....	32
5.6.1	Porovnání kladných a záporných impulsů .....	32
<b>6</b>	<b>Měření stejnosměrného proudu</b>	<b>34</b>
6.1	Měření nezalitého senzoru .....	34
6.2	Měření zalitého senzoru .....	41
<b>7</b>	<b>Teplotní závislost obvodu</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Srovnání citlivostí jednotlivých typů feromagnetických magnetorezistorů [4] .....	3
Obr. 1.2	Typický výstupní impuls Wiegandova senzoru - 2V/DIV, 5μSec/DIV [5] .....	4
Obr. 1.3	Geometrické rozměry Wiegandova senzoru [5] .....	4
Obr. 1.4	Výstupní charakteristiky Wiegandova senzoru série 2000 [5] .....	5
Obr. 1.5	Elektrické zapojení snímacího obvodu senzoru [5] .....	5
Obr. 2.1	Hysterezní smyčky při použití monokrystalického drátu [6] .....	6
Obr. 2.2	Rychlost přeběhu v závislosti na velikosti intenzity magnetického pole [6] .....	6
Obr. 2.3	Závislost změny intenzity magnetického pole na namáhání drátu [6] .....	7
Obr. 2.4	Impulsy indukované cívkou se 200 závitů [6] .....	7
Obr. 2.5	Závislost indukovaného napětí na frekvenci pro 3 typy materiálů [6] .....	8
Obr. 2.6	Frekvenční závislost generovaného impulsu při různé intenzitě pole [6] .....	8
Obr. 2.7	Snímací obvod pro magnetický senzor [6] .....	9
Obr. 2.8	Výstupní charakteristika senzoru využívající bistabilního jádra [6] .....	9
Obr. 3.1	Frekvenční charakteristika indukovaného impulsu [7] .....	10
Obr. 3.2	Porovnání zákmitů impulsu vygenerovaných jednotlivými dráty [7] .....	11
Obr. 3.3	Impulsy vytvořené třemi typy drátů, které jsou magnetizovány rotačním magnetem [7] .....	11
Obr. 3.4	Hysterezní smyčky pro Wiegandův drát [8] .....	12
Obr. 3.5	Závislost výstupního impulsu na velikosti $H_{res}$ [8] .....	12
Obr. 3.6	Výstupní impulsy vygenerované kompozitním drátem [8] .....	13
Obr. 3.7	Změna toku v závislosti na délce $d$ u 30 mm drátu [8] .....	13
Obr. 3.8	Závislost napětí indukovaného pulsu na délce $d$ [8] .....	13
Obr. 3.9	Závislost napětí impulsu na axiální rychlosti pro různé případy $H_{res}$ [8] .....	14
Obr. 3.10	Amplituda výstupního impulsu pro stabilizovaný kompozitní drát a Wiegandův drát [8] .....	14
Obr. 4.1	Princip klešťového ampérmetru [9] .....	16
Obr. 4.2	Výstupní impuls při měřeném proudu 2 A .....	17
Obr. 4.3	Výstupní impuls při měřeném proudu 6 A .....	17
Obr. 4.4	Zapojení obvodu pro měření stejnosměrného proudu .....	18
Obr. 5.1	Geometrické rozměry jádra .....	19
Obr. 5.2	Elektrické schéma magnetického obvodu .....	20
Obr. 5.3	Cívky navinuté na jádře .....	23
Obr. 5.4	Zalitý senzor proudu .....	24



Obr. 5.5	Elektrické schéma tvarovače .....	25
Obr. 5.6	Předloha pro výrobu DPS v požadované úpravě .....	26
Obr. 5.7	Simulace tvarovače s použitím vstupní diody .....	27
Obr. 5.8	Simulace tvarovače bez vstupní diody .....	28
Obr. 5.9	Výstupní impulsy tvarovače .....	28
Obr. 5.10	Vstupní a výstupní signál při vstupním proudu 2 A.....	29
Obr. 5.11	Vstupní a výstupní signál při vstupním proudu 6 A.....	29
Obr. 5.12	Pět period vstupního signálu při proudu 2,5 A.....	30
Obr. 5.13	Výstupní impuls při vstupním proudu 1,25 A .....	31
Obr. 5.14	Výstupní impuls při vstupním proudu 6,2 A .....	31
Obr. 5.15	Kladné a záporné impulsy z tvarovače .....	32
Obr. 5.16	Kladné a záporné impulsy z tvarovače .....	33
Obr. 6.1	Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru .....	35
Obr. 6.2	Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru .....	36
Obr. 6.3	Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru .....	37
Obr. 6.4	Převodní charakteristika pro 100 závitů pomocné cívky .....	38
Obr. 6.5	Odchyšky naměřených hodnot.....	40
Obr. 6.6	Výstupní impuls U1 a synchronizační impuls U2 při proudu 2,5 A .....	40
Obr. 6.7	Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru .....	42
Obr. 6.8	Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru .....	42
Obr. 6.9	Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru .....	43
Obr. 6.10	Převodní charakteristika pro 100 závitů pomocné cívky .....	44
Obr. 6.11	Odchyšky naměřených hodnot.....	46
Obr. 6.12	Převodní charakteristika v závislosti na počtu závitů měřicí cívky .....	48
Obr. 6.13	Převodní charakteristika v závislosti na počtu závitů měřicí cívky .....	48
Obr. 7.1	Převodní charakteristika v závislosti na teplotě .....	50
Obr. 7.2	Převodní charakteristika v závislosti na teplotě .....	50

# SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1	Závislost budícího proudu na počtu závitů cívky.....	22
Tab. 6.1	Tabulka naměřených hodnot převodní charakteristiky .....	34
Tab. 6.2	Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru .....	36
Tab. 6.3	Převodní charakteristika při 100 závitech pomocné cívky.....	37
Tab. 6.4	Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření .....	38
Tab. 6.5	Tabulka naměřených hodnot převodní charakteristiky .....	41
Tab. 6.6	Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru .....	43
Tab. 6.7	Převodní charakteristika při 100 závitech pomocné cívky.....	44
Tab. 6.8	Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření .....	45
Tab. 6.9	Naměřené hodnoty převodní charakteristiky v závislosti na počtu závitů měřicí cívky .....	46
Tab. 7.1	Naměřené hodnoty teplotní závislosti .....	49

# ÚVOD

V tomto dokumentu jsou popsány senzory, používané pro měření magnetického pole. Dokument je zaměřen na magnetický senzor, který využívá Wiegandova efektu. V dokumentu je popsán princip použití tohoto senzoru při bezkontaktním měření střídavého a stejnosměrného proudu. Tento princip měření proudu není uveden v žádné literatuře. Dále se dokument zabývá jevy, které tento senzor využívá.

Následující text je členěn do 7 základních částí. Kapitola 1 představuje jednotlivé typy senzorů měřících magnetické pole. Barkhausenův jev, který vzniká v amorfních drátech je popsán v kapitole 2. V kapitole 3 je popsán Wiegandův drát, který je použit v konstrukci Wiegandova senzoru. V kapitole 4 jsou popsány způsoby měření proudu pomocí magnetických senzorů a vybrané mechanické měřicí přístroje proudu. V kapitole 5 je popsán návrh a realizace magnetického obvodu, návrh, realizace a simulace tvarovače výstupních impulsů a ověření funkce senzoru při měření střídavých proudů. V kapitole 6 jsou zobrazeny výsledky při měření stejnosměrného proudu pomocí senzoru. V kapitole 7 je popsána teplotní závislost senzoru proudu.

# 1 MAGNETICKÉ SENZORY

V následujícím textu jsou krátce popsány jednotlivé typy magnetických senzorů.

## 1.1 Hallova sonda

Hallova sonda je elektronická součástka, která je založena na technickém využití Hallova jevu.

Používá se pro měření a automatickou regulaci magnetických polí, měření velkých stejnosměrných proudů v rozmezí 0,5 kA až 100 kA. Dále se používá na ovládání velkých elektromotorů, multiplikátor, měření součinu veličin. [1]

## 1.2 Feromagnetická sonda ( Fluxgate )

Magnetické sondy typu fluxgate jsou magnetické senzory, které slouží k měření velmi slabých magnetických polí, kde již nepracují magnetorezistory nebo hallovy sondy, t.j. indukce v řádech mikrotleslů až nanotleslů. Tento princip je znám již delší dobu, v posledních letech byly tyto senzory integrovány do provedení malých CMOS senzorů. Využití těchto senzorů v praxi je, detekce velmi slabých magnetických polí, například magnetické pole země. Takto slabé magnetické pole nedokážou detekovat ani nejmodernější magnetorezistory či hallovy senzory. [2]

## 1.3 Feromagnetické magnetorezistory

V této kapitole jsou popsány feromagnetické magnetorezistory, jejich struktura a využití. Tyto senzory jsou rozděleny do tří kategorií. Jedná se o senzory AMR, GMR, SDT.

### 1.3.1 Feromagnetické magnetorezistory AMR

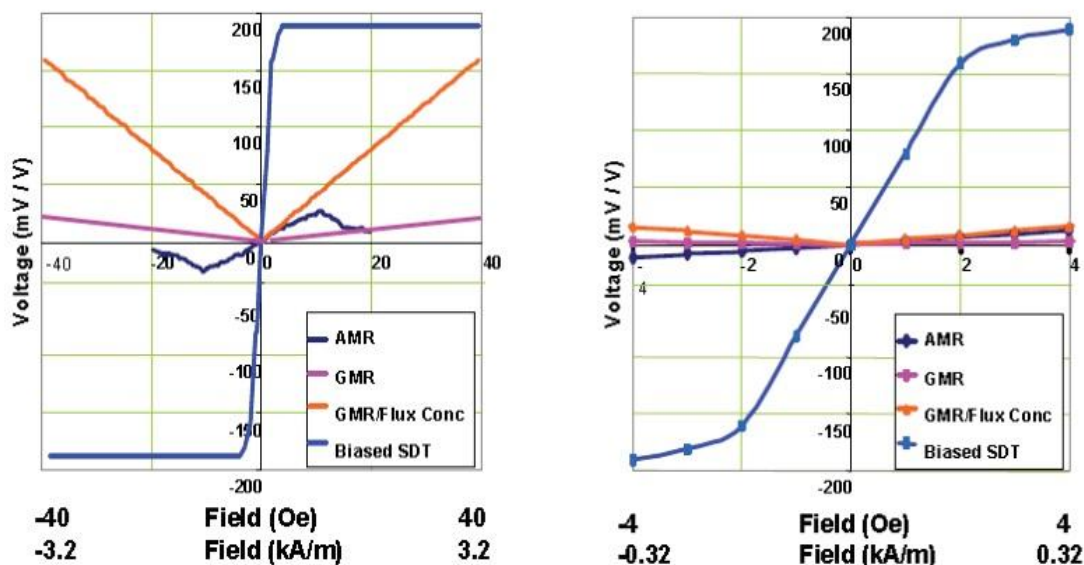
Zkratka AMR znamená anizotropie magnetoresistance. Tento typ senzoru vzniká v tenkých filmech feromagnetika, většinou ve slitině Py, která je z 81% složená z niklu a z 19 % ze železa. Proud tekoucí ve směru magnetizace magnetického materiálu je kladen větší odpor, než proud tekoucí kolmo ke směru magnetizace. Poměr největšího a nejmenšího odporu je kolem 4 %. [3]

### 1.3.2 Feromagnetické magnetorezistory SDT

SDT senzory jsou až o dva řády citlivější než senzory AMR. Jeho velká hystereze však komplikuje použití tohoto senzoru při lineárních měřeních. Tyto senzory mají malou spotřebu díky svému velkému vnitřnímu odporu. Nejčastěji jsou používány ve čtecích hlavách pevných disků. [4]

### 1.3.3 Feromagnetické magnetorezistory GMR

Struktura GMR senzoru je podobná senzoru SDT. Citlivost GMR je podobná citlivosti AMR. Tento senzor je využíván v aplikacích, kde je třeba co nejmenšího rozměru senzoru.[4] Na Obr. 1.1 je vidět srovnání citlivosti jednotlivých typů feromagnetických magnetorezistorů.



Obr. 1.1 Srovnání citlivostí jednotlivých typů feromagnetických magnetorezistorů [4]

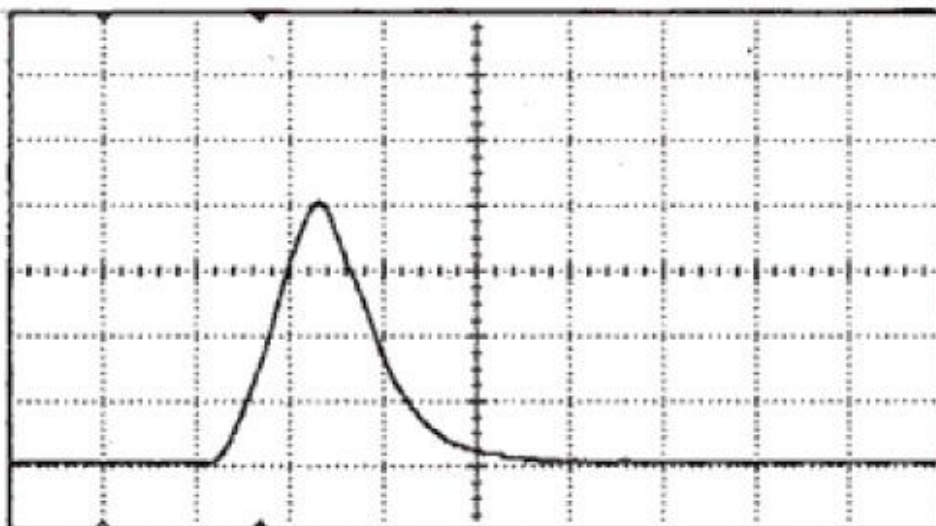
## 1.4 Magnetický senzor využívající Wiegandova efektu

Pro měření magnetického pole je možné použít senzor pracující na principu Wiegandova efektu. Tento senzor je použit jako řešení semestrálního projektu na téma Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu. V řešení je použit senzor firmy Beijing Tianlong Control System Ltd., série 2000.

Senzor pracující na tomto principu je magnetický senzor, který na svém výstupu generuje impulsy, pokud se senzor nachází ve střídavém magnetickém poli. Tento senzor pracuje pouze se střídavými magnetickými poli. Amplituda výstupního pulsu je určena intenzitou magnetického pole, ve kterém se senzor nachází. Sensory nepotřebují žádné externí napájení a pracují téměř od jednotek Hz až do frekvence 20 kHz. Polaritou výstupního pulsu lze jednoduše určit orientaci magnetického pole. Wiegandovy senzory neobsahují žádné polovodiče a také neobsahují žádné pohyblivé části.

Tyto senzory jsou používány v náročných prostředích. Jejich uplatnění je například použití v měřicích zařízeních, které měří průtok vody, plynu nebo při měření v elektroměrech. Dále také dopravníkové aplikace při řízení procesů zařízení. Dále se využívají při měření rychlosti otáčení hřídele motorů nebo pro automobilové aplikace, například tachometry nebo jiné rotační počítací zařízení. [5]

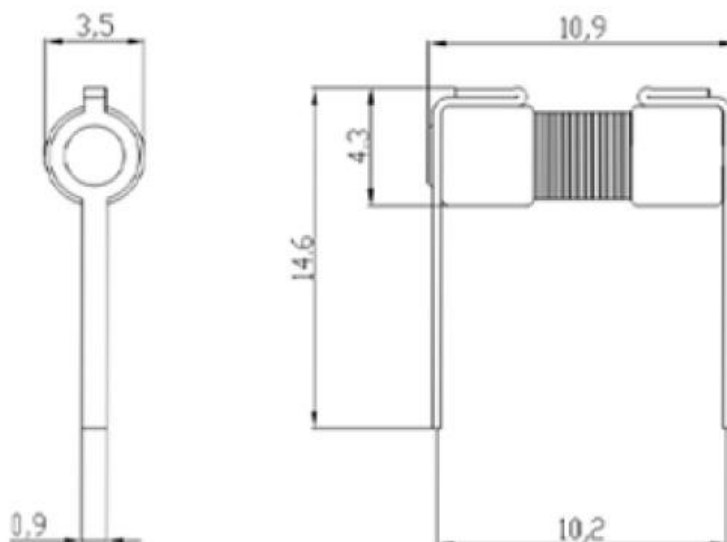
Na Obr. 1.2 je vidět typický výstupní Wiegandův impuls.



Obr. 1.2 Typický výstupní impuls Wiegandova senzoru - 2V/DIV, 5 $\mu$ Sec/DIV [5]

Specifikace senzoru Série 2000 je následující. Maximální velikost magnetické indukce pole do kterého je senzor umístěn není definována, ale má své hranice. Při malé indukci nedojde k vytvoření impulsu na výstupu, při velké magnetické indukci dochází k tomu, že výstupní impuls nemá takový tvar jako na Obr. 1.2, ale má už více vrcholů. Amplituda výstupního signálu je minimálně 2,75 voltů, při magnetické indukci 85 gauss, to je magnetická indukce o velikosti 8,5 mT. Typická šířka impulsu je při amplitudě 1 volt kolem 10  $\mu$ s. Stejnosměrný odpor cívky senzoru je  $350 \Omega \pm 25 \Omega$ . Frekvenční rozsah ve kterém pracuje senzor správně je 0 kHz až 20 kHz. Operační teplota je od -40°C do +125°C. Cívka je integrována do pouzdra Tin Plated Brass, MIL-T-10727B. [5]

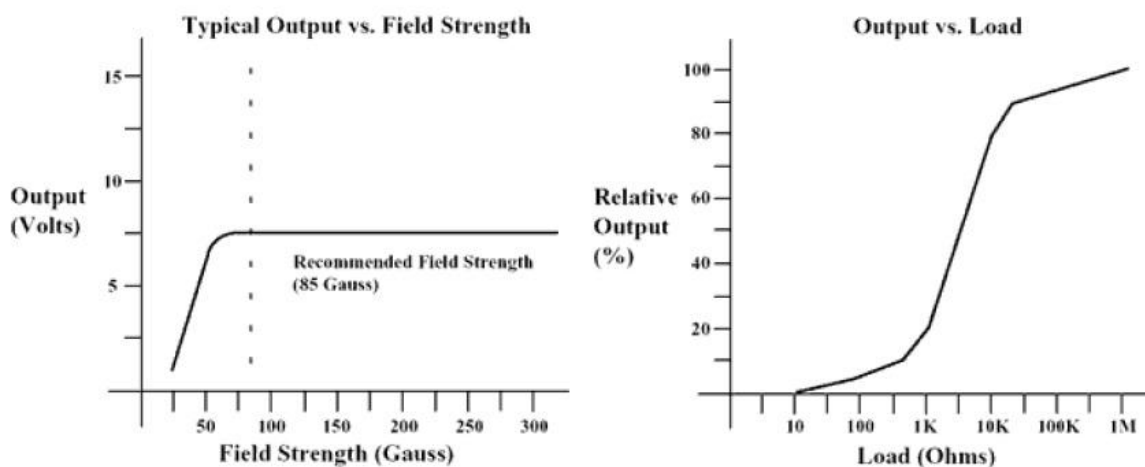
Na obrázku Obr. 1.3 jsou uvedeny geometrické rozměry Wiegandova senzoru série 2000



Obr. 1.3 Geometrické rozměry Wiegandova senzoru [5]

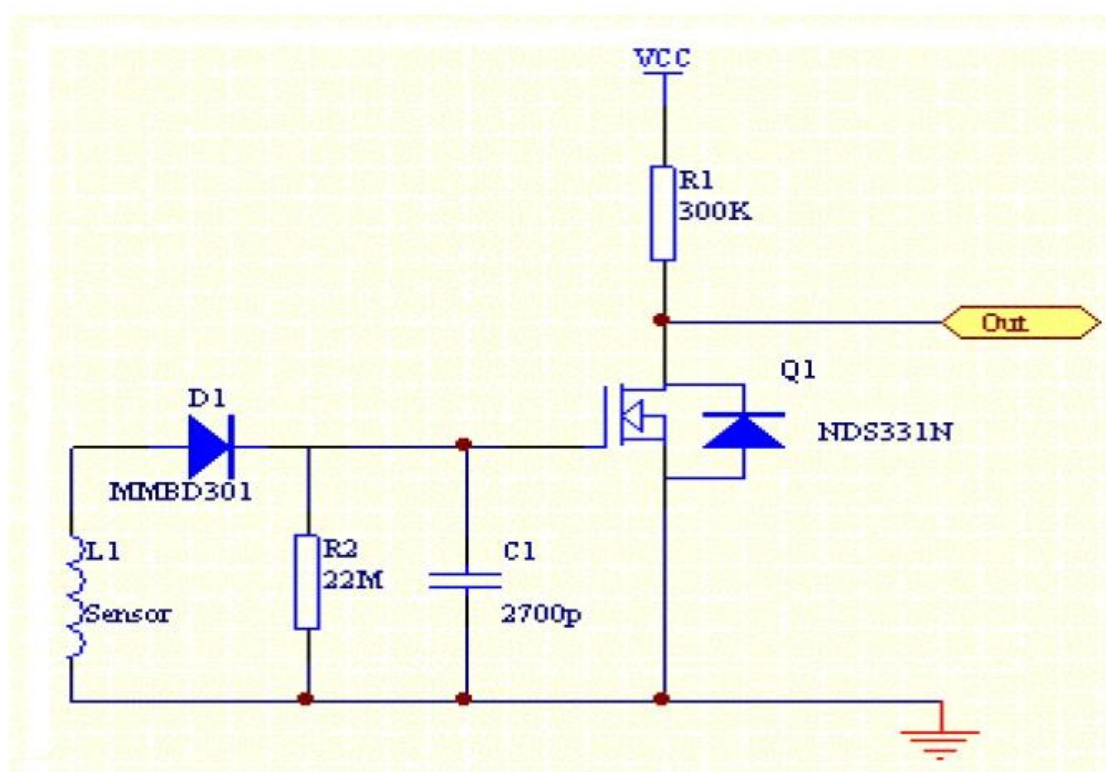
Na Obr. 1.4 jsou vidět výstupní charakteristiky Wiegandova senzoru série 2000. Z obrázku vyplývá, že doporučená minimální magnetická indukce pole je 85 gaussů. Senzor

pracuje i s magnetickými poli menšími než 85 gaussů. Důležitá je také velikost připojené impedance zátěže na výstup senzoru, podle obrázku je minimální zátěž v řádech desítek k $\Omega$ , aby se vygenerovaný impuls nespotřeboval v zátěži a aby se dostalo minimálně 80 % napěťové úrovně impulsu do měřicího zařízení.



Obr. 1.4 Výstupní charakteristiky Wiegandova senzoru série 2000 [5]

Na Obr. 1.5 je vidět elektrické zapojení snímacího obvodu. Ze zapojení je zřejmé, že obvod propustí pouze kladné impulsy vytvořené Wiegandovým senzorem, které jsou zesíleny tranzistorem a invertovány na výstupu pro další zpracování vyhodnocovací elektronikou.



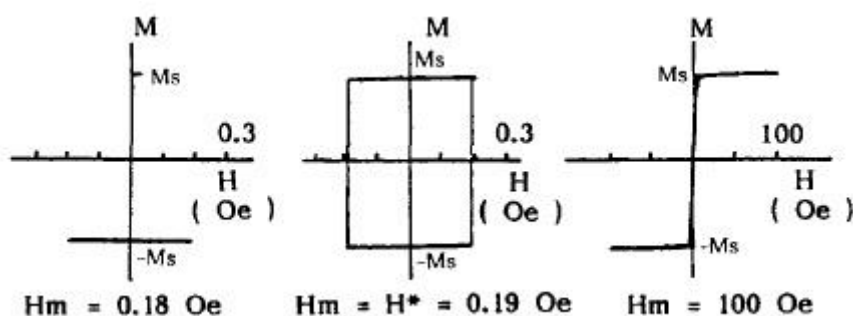
Obr. 1.5 Elektrické zapojení snímacího obvodu senzoru [5]

## 2 BARKHAUSENŮV JEV

V této kapitole je popsán Barkhausenův jev, jeho charakteristiky, využití jevu při generování napětových impulsů a aplikace v magnetických senzorech.

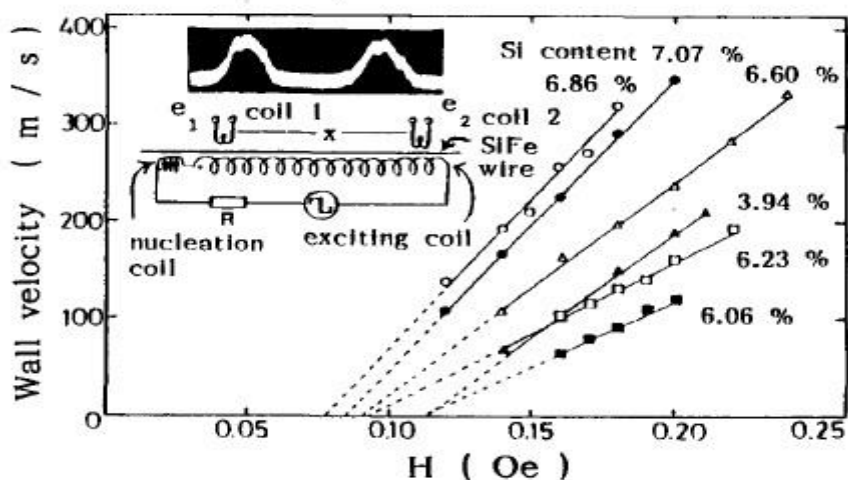
### 2.1 Barkhausenův jev

Citlivý a stabilní velký Barkhausenův efekt byl nově objeven na 4 - 8 % SiFe monokrystalickém drátu, který byl vyvinut a vyroben firmou Toyobo Co. R & D. Nový pulzní generátor, jehož prvky jsou tvořeny 6,3 % SiFe monokrystalickým drátem, který má téměř nulovou magnetizaci. Pulsy napětí jsou vyvolávány na cívce aplikované ve střídavém magnetickém poli. Pole může být generováno s frekvencí 0,01 Hz až 10 kHz.



Obr. 2.1 Hysterezní smyčky při použití monokrystalického drátu [6]

Obr. 2.1 ukazuje typickou bistabilní MH hysterezní smyčku, při použití monokrystalického drátu 6,5 % SiFe, který je tvořen z 6,5 % křemíkem a z 93,5 % železem. Drát má délku 30 cm a průměr 67  $\mu\text{m}$ . Drát je magnetizován střídavým sinusovým polem s frekvencí 60 Hz a amplitudou  $H_m$ , která se mění podle obrázku. Intenzita magnetického pole  $H_m$  je udávána v jednotkách Oersted. Převod mezi jednotkou Oersted a  $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$  je následující. Jeden Oersted je roven intenzitě magnetického pole o velikosti 79,58  $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ . Pro hodnoty  $H_m$  menší než 0,18 Oe nedochází ke změně magnetického toku. Ke kompletnímu přepínání toku dochází při  $H_m$  větší než 0,19 Oe. Pravoúhlá hysterezní smyčka se při intenzitě magnetického pole  $H_m = 100$  Oe a větší sloučí do jedné, což je vidět na Obr. 2.1, třetí graf.

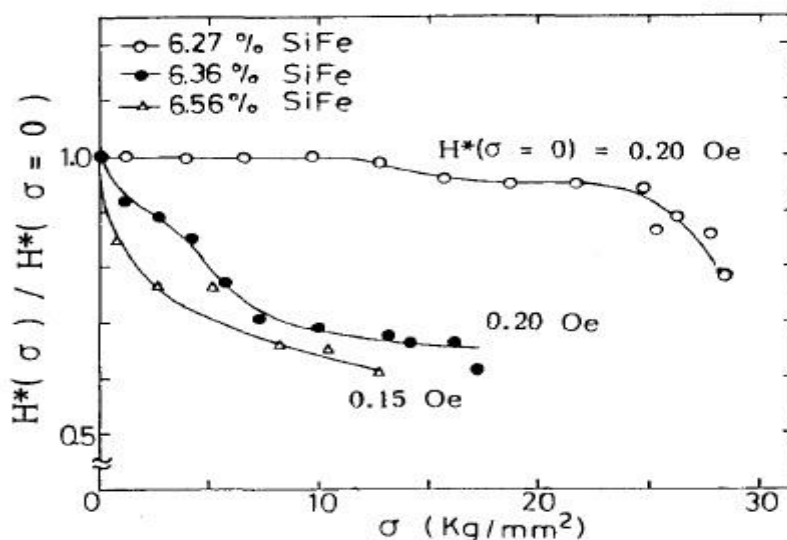


Obr. 2.2 Rychlost přeběhu v závislosti na velikosti intenzity magnetického pole [6]



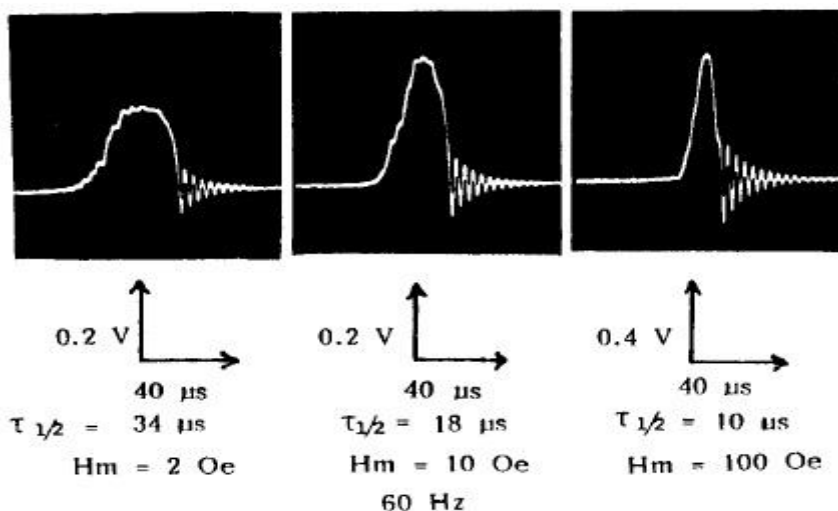
Na Obr. 2.2 jsou naměřené hodnoty rychlosti přeběhu v závislosti na intenzitě magnetického pole pro jednotlivé složení měřeného drátu. V grafu je procentuálně vyjádřen podíl křemíku v měřeném drátu. Zobrazeny jsou charakteristiky některých SiFe drátů s délkou 20 až 30 cm, z nichž každý je uzavřen v 2 milimetrové trubici. Rychlost oblasti stěny se měří při dvou napětích impulsu,  $e_1$  a  $e_2$ , na dvou měřicích cívkách. Cívka 1 je umístěna 10 cm od cívky 2. [6]

## 2.2 Pulzní generátor



Obr. 2.3 Závislost změny intenzity magnetického pole na namáhání drátu [6]

Obr. 2.3 znázorňuje naměřené výsledky variant intenzity magnetického pole v závislosti na namáhání drátu v tahu. Charakteristika je změřena pro tři typy SiFe drátů. Nejlepší stability intenzity magnetického pole je dosaženo u drátu se složením 6,27 % SiFe, kvůli téměř nulové hodnotě  $\lambda_{100}/K_1$ . Spolehlivý impuls je tedy očekáván od monokrystalického drátu se složením 6,27 % SiFe, který je odolný proti rušení.

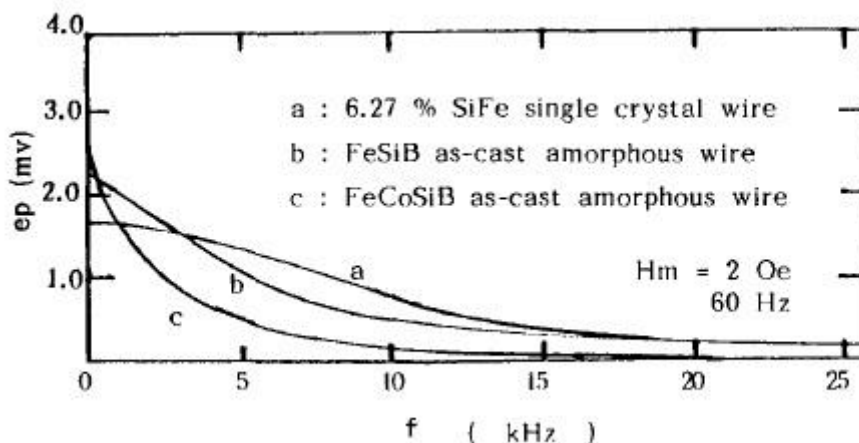


Obr. 2.4 Impulsy indukované cívkou se 200 závitů [6]

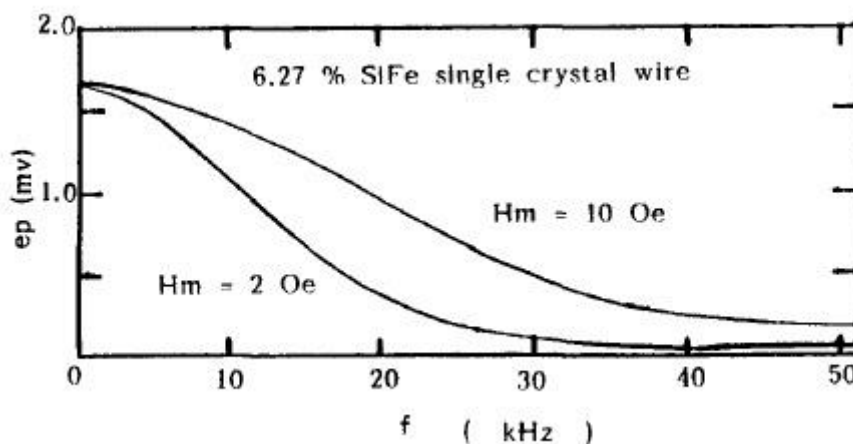
Na Obr. 2.4 je vidět indukované impulsy v cívce se 200 závitů, která je navinuta z drátu

6,27 % SiFe. Drát je dlouhý 7 cm a jeho průměr je 60  $\mu\text{m}$ . Šířky impulsu jsou zobrazeny pouze pro půlku periody. Šířka impulsu byla měřena pro více intenzit magnetického pole. Pro intenzitu 2 Oe je šířka pulsu 34  $\mu\text{s}$ , pro 10 Oe je šířka 12  $\mu\text{s}$  a pro 100 Oe je šířka 10  $\mu\text{s}$ .

Na Obr. 2.5 je vidět frekvenční spektrum pro indukované pulsy napětí pro tři různé typy drátů. Jednotlivé typy jsou 6,27 % SiFe o délce 10 cm a průměru 65  $\mu\text{m}$ , Fe 77,5 Si 7,5 B 15 litý amorfni drát délky 10 cm s průměrem 120  $\mu\text{m}$  a drát o složení Fe 4,5 Co 68 Si 12,5 B 15 odlitek zeromagnetistrictive amorfniho materiálu o délce 10 cm a průměru 130  $\mu\text{m}$ . Dráty byly magnetizovány střídavým sinusovým polem s kmitočtem 60 Hz a intenzitou 2 Oe. Vyšší harmonické byly získány ze vzorku 6,27 % SiFe.



Obr. 2.5 Závislost indukovaného napětí na frekvenci pro 3 typy materiálů [6]

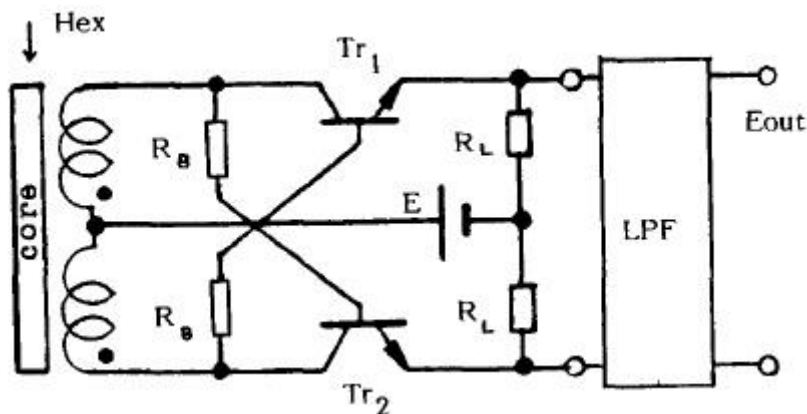


Obr. 2.6 Frekvenční závislost generovaného impulsu při různé intenzitě pole [6]

Na Obr. 2.6 je zobrazena frekvenční závislost amplitudy generovaného signálu pomocí drátu 6,27 % SiFe. Charakteristiky je změřena pro různé velikosti intenzity magnetického pole. Jsou měřeny charakteristiky pro intenzitu 2 Oe a 10 Oe.

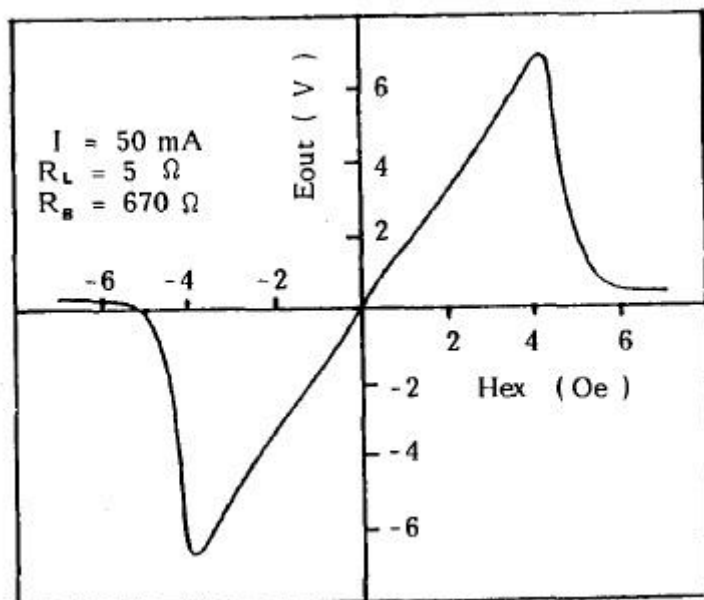
## 2.3 Aplikace do magnetického senzoru

Spolehlivý a přesný snímač magnetického pole je tvořen pomocí 6,27 % SiFe monokrystalického drátu s využitím jeho vysoké stability a bistabilního toku. Na Obr. 2.7 je vidět zapojení snímače magnetického pole s využitím jednojádrového magnetického multivibrátoru a filtru typu dolní propust (LPF). Tyto senzor využívají vysokou pravoúhlost hysterezní smyčky.



Obr. 2.7 Snímací obvod pro magnetický senzor [6]

Dobrá linearita a žádná hystereze charakteristiky byly získány za použití tohoto jednoduchého snímacího obvodu, bez jakékoliv zpětné vazby. Tento jednoduchý a spolehlivý magnetický senzor se používá v průmyslových robotech, automobilovém průmyslu a různých elektrických ovládacích systémech. Na Obr. 2.8 je vidět výstupní charakteristika senzoru využívajícího bistabilního jádra. [6]



Obr. 2.8 Výstupní charakteristika senzoru využívající bistabilního jádra [6]

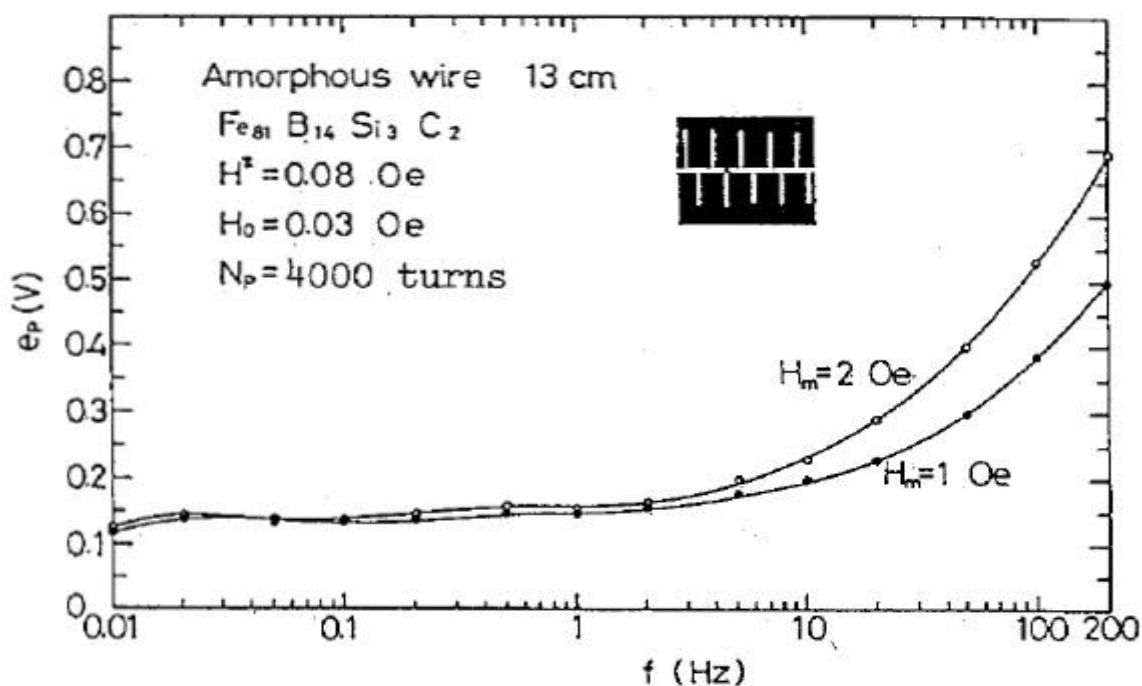
### 3 WIEGANDŮV DRÁT

V této kapitole je popsán jev vznikající na Wiegandově drátu. Dále je zde porovnání amorfních drátů s Wiegandovým s případě generování pulsů.

#### 3.1 Pulzní generátor s amorfními bistabilními dráty

Citlivé pulzní generátory, které indukují ostré napět'ové impulzy v širokém frekvenčním rozsahu střídavých magnetických polí, nachází řadu aplikací v automobilech, průmyslových robotech a elektrických motorových hnacích systémech.

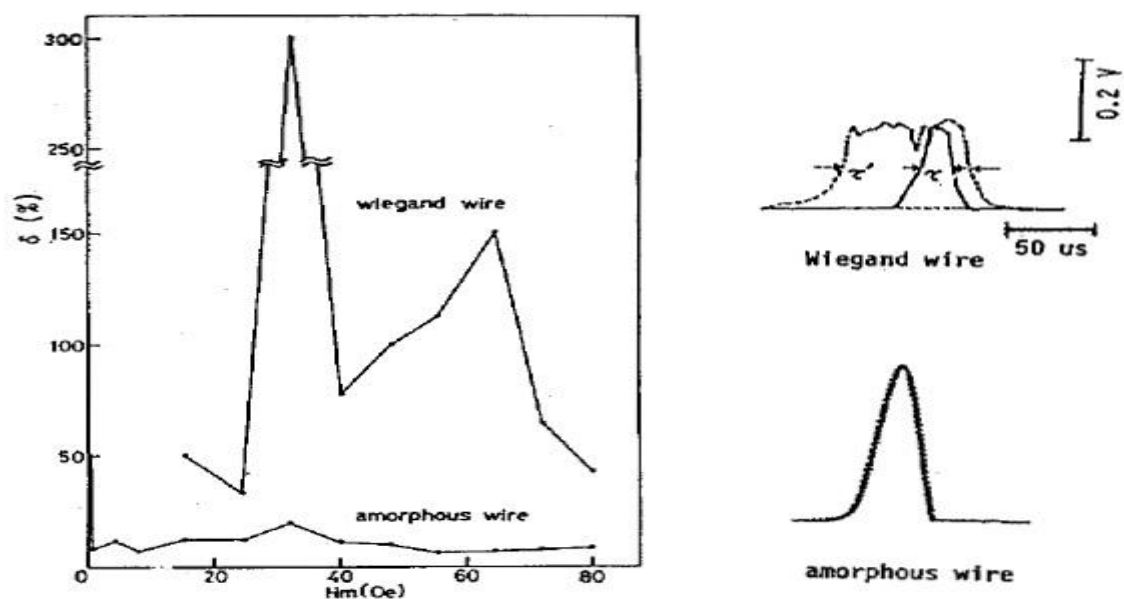
Na Obr. 3.1 je vidět amplituda indukovaného napět'ového impulsu, při použití 13 cm dlouhého amorfního drátu, který je magnetizován jednotným sinusovým polem o intenzitě  $H_m = 1$  Oe a  $H_m = 2$  Oe o různé frekvenci. Frekvence se mění od 0,01 Hz do 10 Hz, to znamená, že rychlost obratu je nezávislá na rychlosti změny  $H_m$ . Tato nezávislost frekvence je velmi důležitá pro uplatnění tohoto drátu jako senzoru magnetického pole.



Obr. 3.1 Frekvenční charakteristika indukovaného impulsu [7]

Z Obr. 3.1 je vidět, že napětí indukovaného impulsu není v pásmu od 0,01 Hz do 10 Hz nijak výrazně frekvenčně závislé. V tomto pásmu není velikost indukovaného impulsu závislá na intenzitě magnetického pole, obě křivky jsou velice podobné. [7]

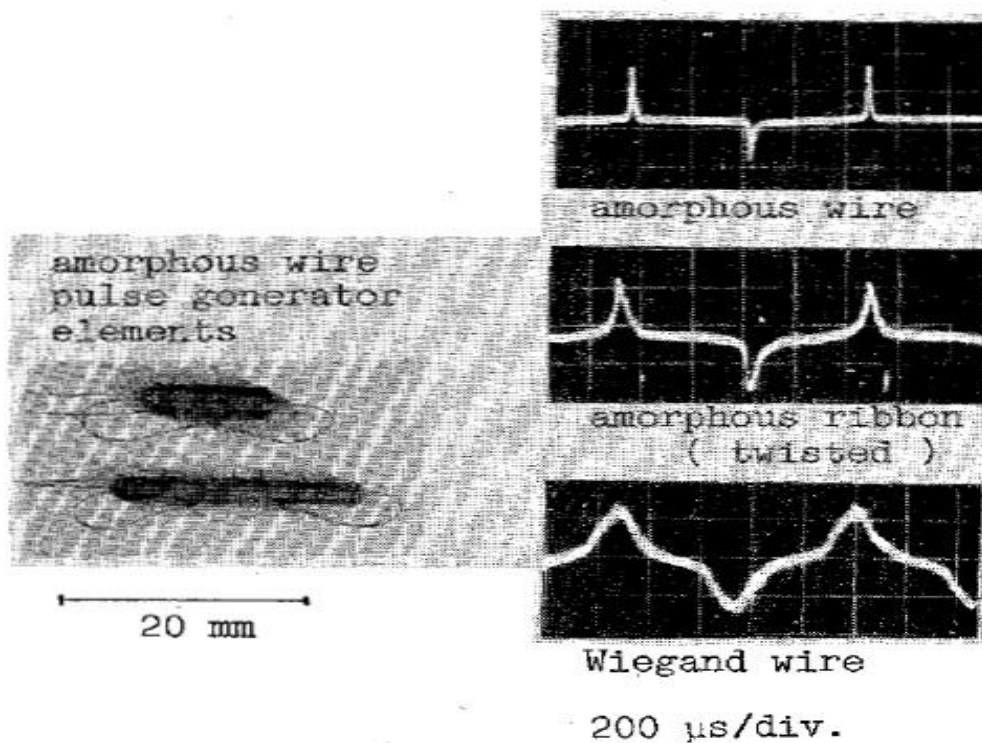
Na Obr. 3.2 je zobrazeno porovnání zákmitů indukovaného pulsu pomocí amorfního drátu a Wiegandova drátu. Oba dráty jsou magnetizovány střídavým sinusovým polem s kmitočtem 60 Hz.



Obr. 3.2 Porovnání zákmitů impulsu vygenerovaných jednotlivými dráty [7]

Na Obr. 3.3 jsou porovnány impulsy vytvořené pomocí různých drátů. Zde je použit amorfni drát, kroucený amorfni pásek se složením Fe 79 Cr 2 B 17 Si 2 a Wiegandův drát. Tyto dráty jsou navinuty na cívku o délce 20 mm. Na cívce je navinuto 500 závitů. Cívky jsou magnetizovány pomocí vícepólového magnetového prstence umístěného na hřídeli motoru.

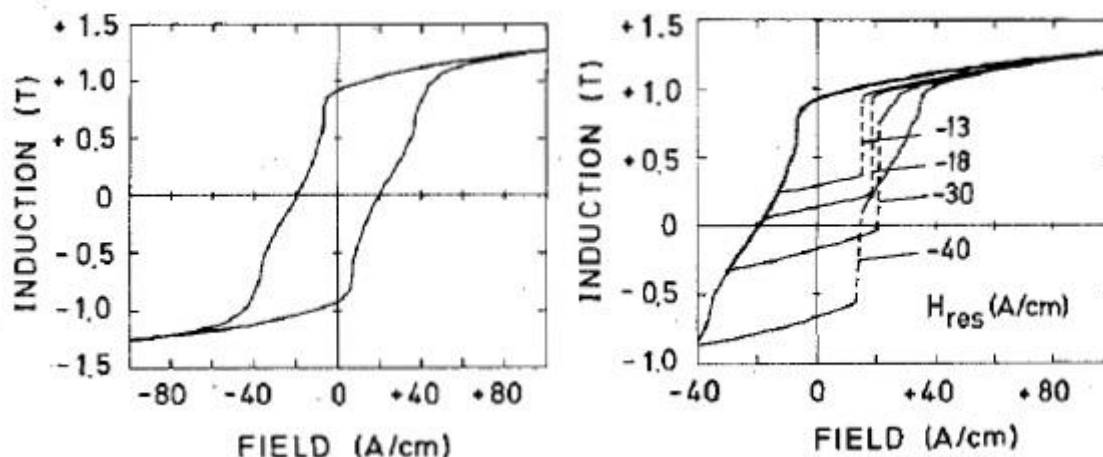
Z toho vyplývá, že nejostřejší a zároveň nestabilnější impuls vzniká v cívce navinuté amorfni drátem.



Obr. 3.3 Impulsy vytvořené třemi typy drátů, které jsou magnetizovány rotačním magnetem [7]

## 3.2 Wiegandův drát

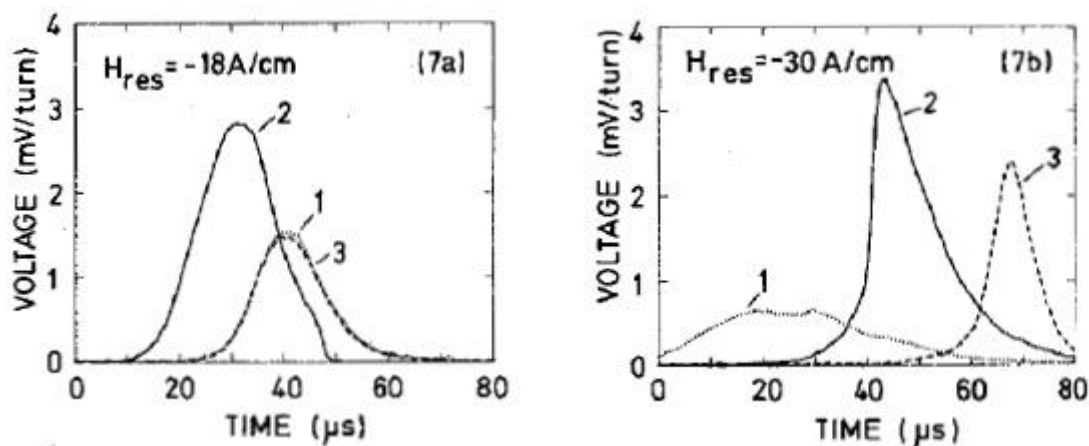
Hysterezní smyčka Wiegandova drátu, která je zobrazena na Obr. 3.4, se podstatně liší od hysterezní smyčky kompozitního drátu. V případě symetrického řízení se nezobrazí žádná velká diskontinuita. To zobrazuje levý graf na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Hysterezní smyčky pro Wiegandův drát [8]

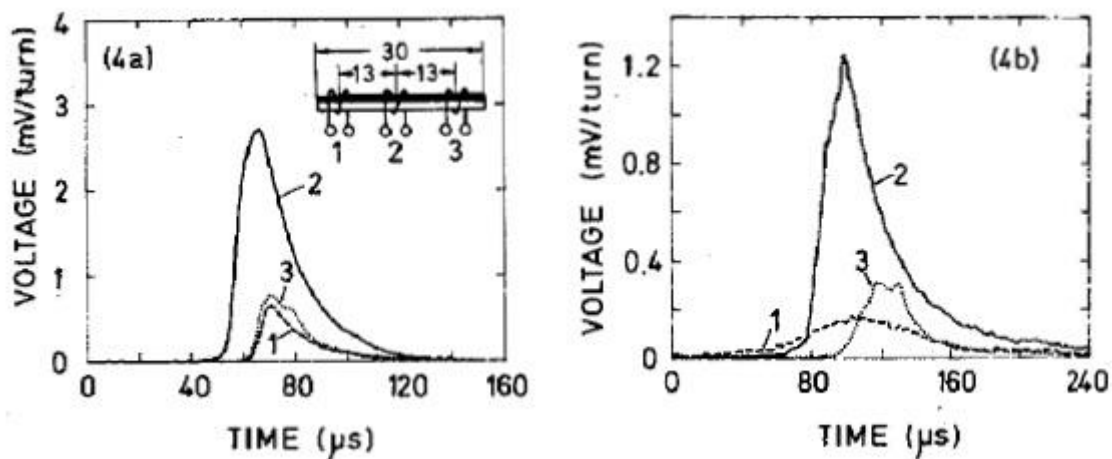
S použitím asymetrického řízení nastane velký Barkhausenův skok, který zobrazuje pravý graf na Obr. 3.4. Na rozdíl od kompozitního drátu, řízení polem  $H - H_0$  a v důsledku pulzního napětí bude do značné míry záviset na resetování pole.

Optimální řídicí podmínky jsou pro malý rozsah oblasti resetování pole. Od  $-18 \text{ A/cm}$  až do  $-22 \text{ A/cm}$ . Pak obrácení toku začíná ve středu drátu. To je zobrazeno na Obr. 3.5, graf 7a.



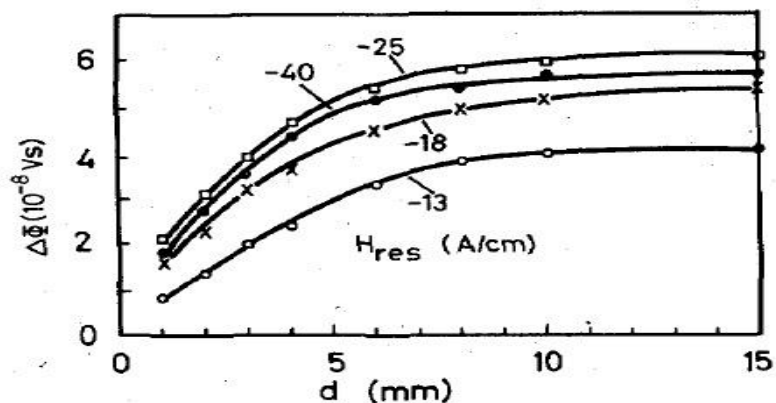
Obr. 3.5 Závislost výstupního impulsu na velikosti  $H_{res}$  [8]

Když se znovu zvyšuje intenzita pole až do  $-30 \text{ A/cm}$  nebo více, chování se zcela změní. Nyní puls začne náhodně od jednoho konce drátu, to lze vidět na Obr. 3.5, graf 7b a průměrná úroveň impulsu snižuje nestabilní chování srovnatelné se situací na Obr. 3.6. Na tomto obrázku je znázorněna časová závislost výstupního impulsu napětí, které je měřeno na třech cívkách, které jsou navinuty stabilizovaným kompozitním drátem.



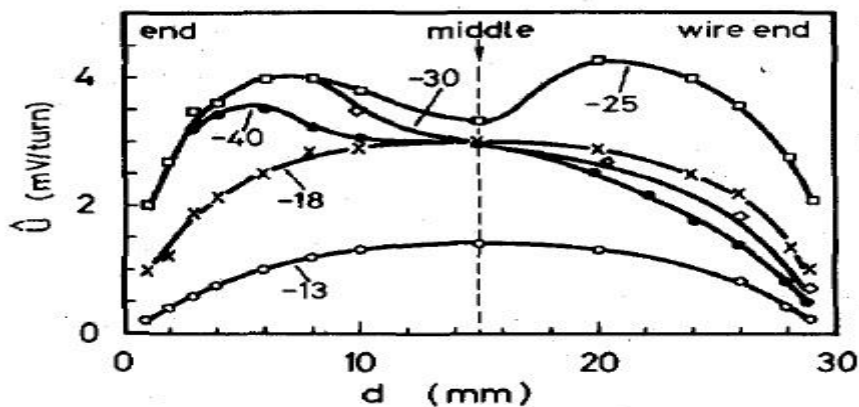
Obr. 3.6 Výstupní impulsy vygenerované kompozitním drátem [8]

Typické chování Wiegandova drátu a jeho silná závislost na resetu pole je znázorněno na obrázcích. Na Obr. 3.7 je znázorněna závislost toku na délce  $d$  u 30 mm drátu.



Obr. 3.7 Změna toku v závislosti na délce  $d$  u 30 mm drátu [8]

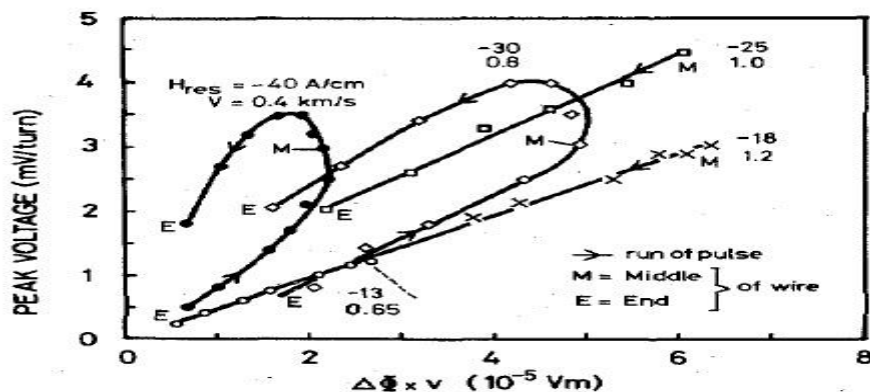
Průběh změny magnetického toku podél Wiegandova drátu, v závislosti na poloze  $d$ , se mění s aplikováním resetu pole. Optimální podmínky, kdy špičkové napětí dosahuje svého maxima je v polovině drátu. To je zobrazeno na Obr. 3.8.



Obr. 3.8 Závislost napětí indukovaného pulsu na délce  $d$  [8]

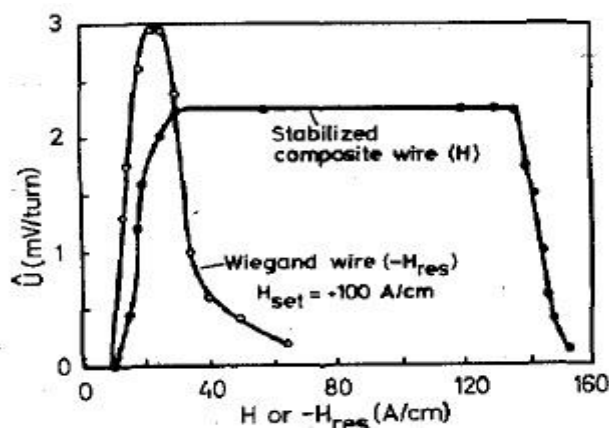
Pro  $H_{res} = -30$  až  $-40$  A/cm však zvrát toku začíná na konci a dosahuje nejvyšší hodnoty v blízkosti opačného konce, ale s velmi nestabilní maximální amplitudou. Jednotný mechanismus remagnetizace podél drátu by znamenal, že v každém bodě je  $U \sim \Delta\Phi \cdot v$ , kde  $v$  je axiální rychlost.

Jak je uvedeno na Obr. 3.9, platí to pro Wiegandův drát, pokud jsou optimální řídicí podmínky. Zde předpokládáme magnetizační proces srovnatelný s Sixtus - Tonks typem ve stabilním kompozitním drátu. [8]



Obr. 3.9 Závislost napětí impulsu na axiální rychlosti pro různé případy  $H_{res}$  [8]

Komplexní chování Wiegandova drátu je založeno na zcela jiném zpracování. Pomocí kroucení tento vodič získá povrch s vyšší koercivitou než jádro, ale pravděpodobně bez ostrého ohraničení. Pro tento drát je spínací jádro magneticky stabilizované pláštěm, pokud je reset pole menší, než koercivita pláště, dosáhne optimálního stavu pokud  $B = 0$ . To je v případě pokud se  $H_{res}$  nachází v oblasti  $-18$  až  $-22$  A/cm. Zvyšující se resetování pole neustále odmagnetizovává plášť, kde rychlé obracení toku začíná na konci drátu a je nakonec zanedbatelný ve vyšších oblastech resetování.



Obr. 3.10 Amplituda výstupního impulsu pro stabilizovaný kompozitní drát a Wiegandův drát [8]

Naproti tomu stabilizovaný kompozitní drát dává konstantní úroveň impulsu napětí v širokém rozsahu amplitudy pole, Obr. 3.10, mezi minimální prahovou hodnotou a koercivitou permanentně zmagnetizovaného drátu, která je maximální hodnotou. Ta může být zvětšena až na  $400$  A/cm pomocí permanentních magnetů s odpovídající koercivitou. Tento napěťový impuls je vhodnější než impuls vygenerovaný wiegandovým drátem.



## 4 MĚŘENÍ PROUDU S VYUŽITÍM MAGNETICKÝCH SENZORŮ

V následující kapitole jsou stručně popsány způsoby měření střídavých a stejnosměrných proudů pomocí klasických ampérmetrů, analogových nebo digitálních. dále je zde popsáno měření proudu pomocí magnetického senzoru využívajícího wiegandova efektu.

Z elektromechanických ústrojí se k měření stejnosměrných proudů téměř výhradně používá ústrojí magnetoelektrické. Magnetoelektrickými ampérmetry bez bočníku lze měřit proudy v rozmezí  $10^{-5}$  až  $10^{-2}$  A, s použitím bočníku lze měřit proudy  $10^{-2}$  až  $10^4$  A. Pro měření proudů menších než  $10^{-5}$  A je nutné požit různé typy měřících zesilovačů. Například převodník proudu na napětí. Ten umožňuje měření malých proudů bez úbytků napětí, vstupní odpor ampérmetru s takovým převodníkem se blíží k nule. Tyto převodníky bývají součástí číslicových ampérmetrů. Při měření malých proudů (pA) se pomocí velkého odporu převede proud na napětí, které je potom měřeno mikrovoltmetrem s modulačním zesilovačem.

Pro měření střídavých proudů jsou používány ampérmetry, které měří efektivní hodnotu střídavého proudu. Ampérmetry jsou většinou konstruovány s feromagnetickým měřícím ústrojím. Tyto přístroje jsou vhodné k měření proudů s kmitočtem do 100 Hz. Kmitočtový rozsah je u feromagnetických měřících přístrojů limitující. Některé speciální ampérmetry jsou konstruovány na měření proudu s kmitočtem 1 kHz, i tento frekvenční rozsah je však nedostačující.

Feromagnetické ampérmetry jsou vyráběny většinou jako jednorozsahové, pro měření proudů od 1 mA do 100 mA, ústrojí na napjatých vláknech nebo pro měření proudů od 100 mA do 200 A, hrotové uložení otočné části. Menší rozsahy není vhodné realizovat z důvodu velkého úbytku napětí na ampérmetru, čím dochází k značné chybě metody.

Elektrodynamické ampérmetry měří také efektivní hodnotu střídavého proudu. Jsou použitelné pro kmitočty do 1 kHz. Jejich výroba je finančně náročnější, proto jsou konstruovány pouze přesné laboratorní přístroje s třídou přesnosti 0,1 a 0,2.

Magnetoelektrické ampérmetry s usměrňovačem měří střední hodnotu střídavého proudu. Jejich stupnice je cejchována v efektivních hodnotách.

Pro měření proudů větších než 10 A jsou používány měřící transformátory proudu. Zároveň slouží jako galvanické oddělení měřeného obvodu od ampérmetru. Výhodou měřících transformátorů je, že s nimi lze transformovat z velkých proudů na malé, ale i z malých proudů na velké, což neumožňují bočníky ani předřadné odpory. Spotřeba měřícího obvodu s měřícím transformátorem je malá. Nevýhodou měřících transformátorů je, že nelze transformovat harmonické průběhy se stejnosměrnou složkou.

Pro zvýšení rozsahu ampérmetru použijeme bočník. Ten je potřeby využít při měření většího proudu, než na jaký je ampérmetr konstruován. Pokud je například potřeba měřit proud 10 A měřícím přístrojem pro měření maximálního proudu 1 A, je nutné vložit k ampérmetru paralelně takový odpor  $R_B$ , aby bočníkem protékal proud 9 A a ampérmetrem 1 A.[10]

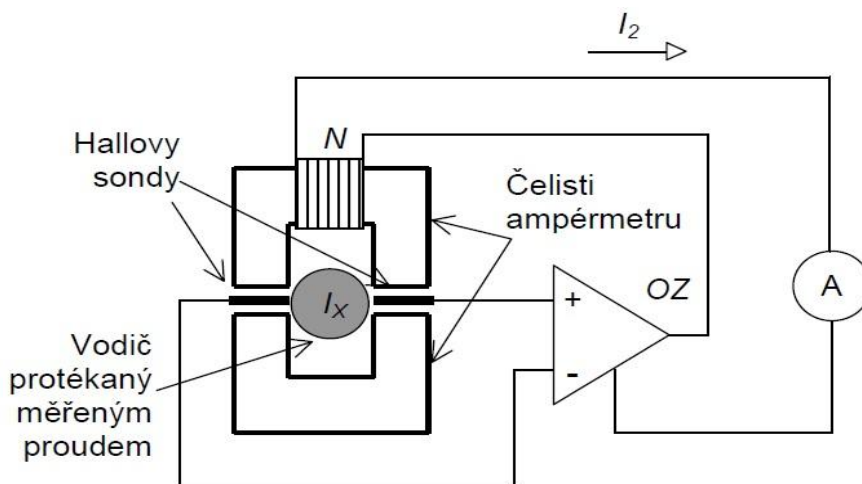
### 4.1 Měření proudu klešťovým ampérmetrem

Pro měření velkých proudů jsou používány nepřímé metody měření, například klešťový ampérmetr. Princip klešťového ampérmetru je uveden na Obr. 4.1. Vodič protékaný měřeným proudem  $I_X$  je obklopen rozevratelnými čelistmi přístroje, na kterých jsou umístěny dvě

Hallový sondy. Na jedné čelisti je navinuta kompenzační cívka s  $N$  závitů. Použitím dvou Hallových sond se eliminuje vliv vnějších magnetických polí. Převodník je linearizovanou zpětnou vazbou. Za předpokladu velkého zesílení zesilovače OZ platí pro měřený proud vztah (4.1).

$$I_X = N * I_2 \quad (4.1)$$

kde  $I_X$  je měřený proud,  $N$  je počet závitů kompenzační cívky,  $I_2$  je proud procházející ampérmetrem



Obr. 4.1 Princip klešťového ampérmetru [9]

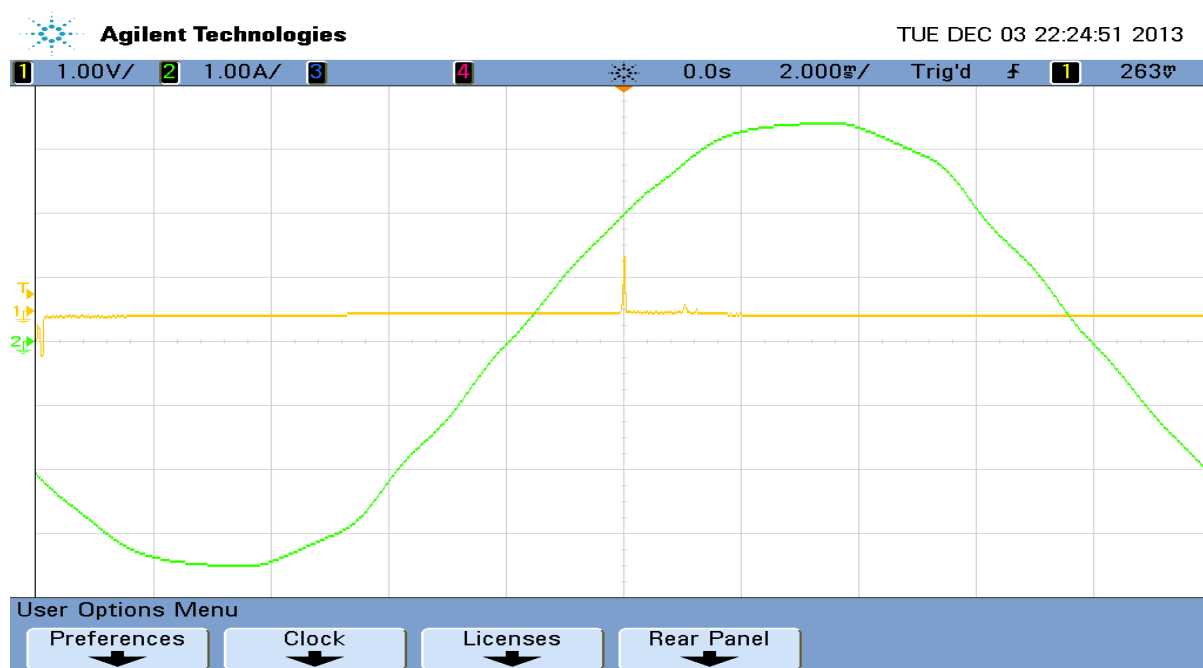
## 4.2 Měření střídavého proudu pomocí wiegandova senzoru

Princip měření střídavého proudu pomocí senzoru využívajícího Wiegandova efektu je následující. Měřený proud protéká cívkou, která je navinuta na jádře z transformátorových plechů. Tím dochází ke generování střídavého magnetického pole. Ve vzduchové mezeře, která je vidět na Obr. 5.1, je umístěn magnetický senzor, který pracuje na principu Wiegandova efektu. Střídavé magnetické pole vygeneruje na výstupu senzoru elektrický impuls. Jeho velikost je závislá na velikosti magnetické indukce pole.

Velikost měřeného proudu ovlivňuje v tomto měřicím uspořádání také čas, kdy je impuls vygenerován v závislosti na nulové úrovni měřeného střídavého proudu. Čas, který je nutný k vygenerování impulsu je tedy závislý na velikosti měřeného proudu. Se zvyšujícím se proudem se doba od nulové úrovně měřeného signálu až po vygenerování impulsu na výstupu senzoru zmenšuje. Závislost mezi měřeným proudem a dobou před vygenerováním impulsu není úplně lineární. Proto je nutné provést měření převodní křivky, ze které vychází vyhodnocovací elektronika při měření.

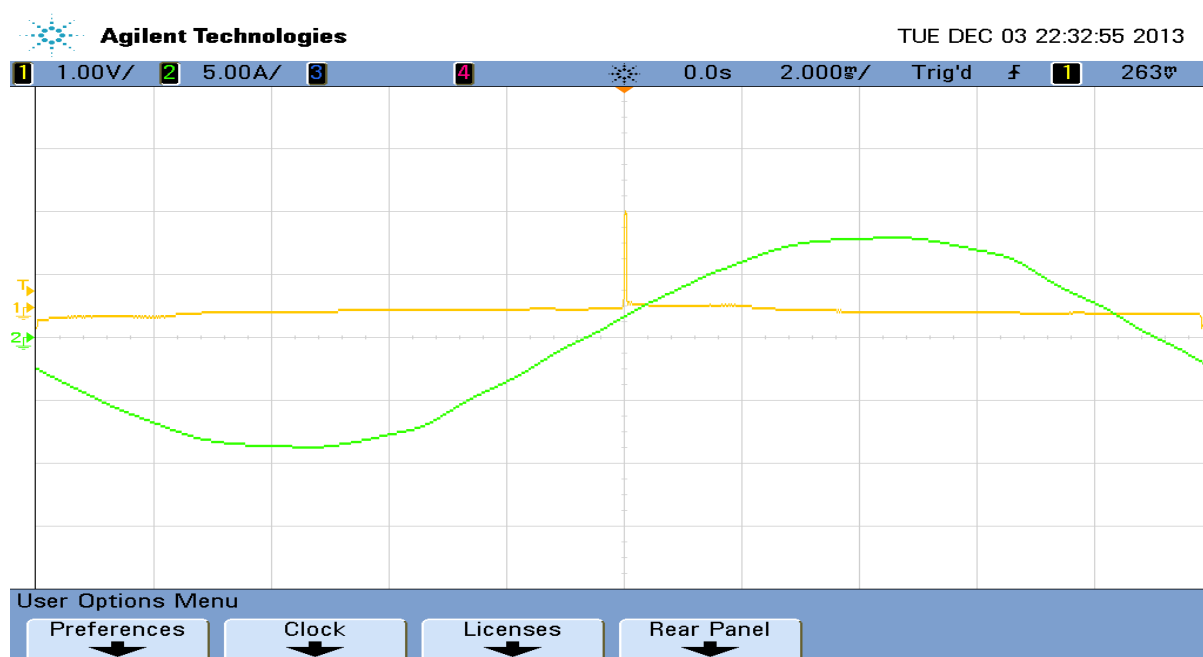
Tímto způsobem je možné měřit pouze střídavé proudy. Maximální měřicí kmitočet je přibližně 2 kHz, protože jádro magnetického obvodu je vyrobeno z transformátorových plechů. Pro měření proudů s vyšší frekvencí je nutné použít jádro z feritu.

Na obrázku Obr. 4.2 lze vidět dobu, potřebnou pro vygenerování impulsu při vstupním proudu 2 A. Doba od nulové úrovně vstupního signálu po vygenerování impulsu je 2 ms. Vstupní signál má sinusový průběh, výstupní signál je impuls.



Obr. 4.2 Výstupní impuls při měřeném proudu 2 A

Pokud má měřený proud velikost 6 A, je doba potřebná k vygenerování impulsu 0,7 ms. Tento průběh je zobrazen na obrázku Obr. 4.3.

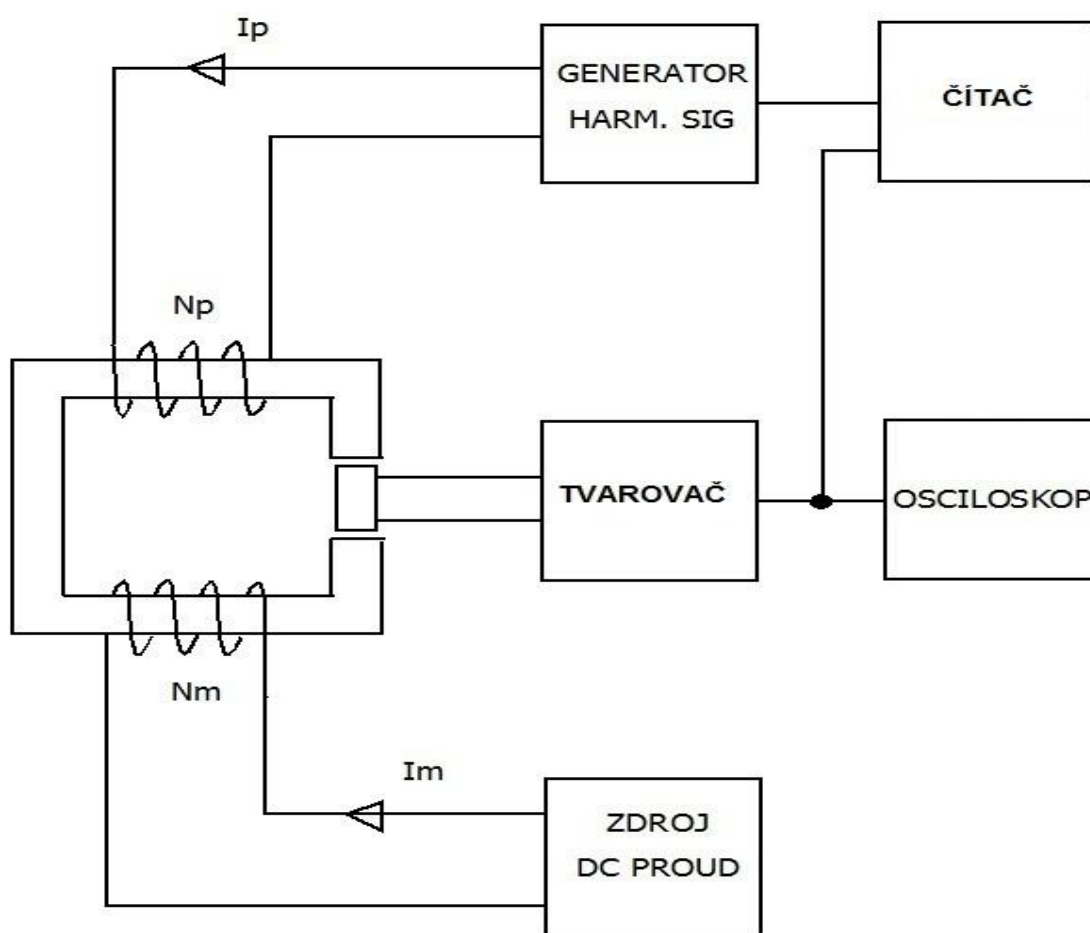


Obr. 4.3 Výstupní impuls při měřeném proudu 6 A

### 4.3 Měření stejnosměrného proudu pomocí wiegandova senzoru

Wiegandův senzor pracuje pouze se střídavými magnetickými poli. Proto bylo pro měření stejnosměrného proudu pomocí wiegandova senzoru nutné navinout na jádro pomocné vinutí, které zajistí střídavé magnetování. Měřený stejnosměrný proud v tomto případě posune harmonický signál pomocné cívky o stejnosměrnou složku. Na jádro byly navinuty cívky s 10, 20, 50 a 100 závitů. Tyto cívky lze jednoduše spojovat v jakýchkoli kombinacích pomocí jumperů. Pro generování harmonického průběhu byl použit generátor Agilent 3320A, který na výstupu generoval harmonický signál s napětím 20 Vpp. Pokud bude výstupní impedance 50  $\Omega$  a sériový odpor vinutí cívky 6,3  $\Omega$ , tak maximální proud dodávaný generátorem bude 0,17 A, pro pomocnou cívku se 150 závitů. Tento proud je dostatečný pro vybudování potřebného magnetického pole.

Na obrázku Obr. 4.4 je zobrazeno zapojení pro měření stejnosměrného proudu. Kde  $N_p$  je počet závitů pomocné cívky,  $N_m$  je počet závitů měřicí cívky,  $I_p$  je proud protékající pomocnou cívku,  $I_m$  je proud protékající měřicí cívku. Na pomocnou cívku je přiveden harmonický signál z generátoru, na měřicí cívku je přiveden stejnosměrný proud. Výstupní impulsy senzoru jsou zpracovány tvarovačem a zobrazeny osciloskopem. Výsledný impuls je společně se synchronizačním impulsem generátoru přiveden na vstupy A a B čítače. Čítač měří časový rozdíl mezi náběžnou hranou synchronizačního impulsu a sestupnou hranou impulsu senzoru.

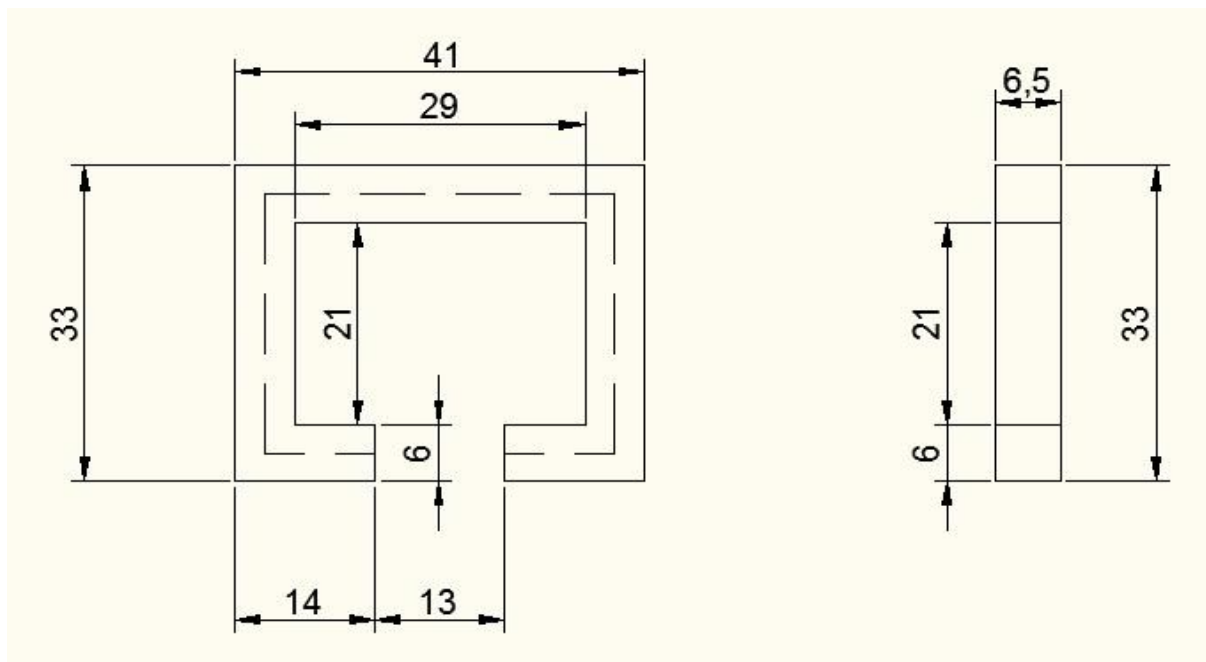


Obr. 4.4 Zapojení obvodu pro měření stejnosměrného proudu

## 5 MĚŘÍCÍ OBVOD

V následujícím kapitole je popsán návrh a realizace magnetického obvodu, který slouží k vytváření magnetického pole pro funkci wiegandova senzoru. Dále je zde popsán také návrh a realizace a simulace tvarovače výstupních impulsů.

### 5.1 Návrh magnetického obvodu

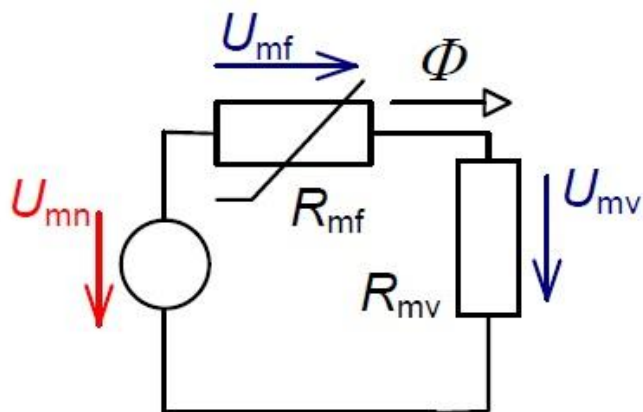


Obr. 5.1 Geometrické rozměry jádra

Na Obr. 5.1 jsou vidět geometrické rozměry jádra pro magnetický obvod. Jádro je tvořeno transformátorovými plechy typu E a I, ze kterých bylo původně vytvořeno jádro pro transformátor. Po mechanické úpravě vznikl tvar jádra, který odpovídá Obr. 5.1. Transformátorové plechy jsou vhodné pro frekvence menší než 100 Hz, proto jsou pro měření střídavého proudu o frekvenci 50 Hz dostačující.

## 5.2 Výpočet parametrů magnetického obvodu

Při výpočtech je vycházeno z modelu magnetického obvodu obsahujícího jednu budící cívku, jádro vyrobené z transformátorových plechů a vzduchové mezery, do které je vložen senzor pracující na principu Wiegandova jevu.



Obr. 5.2 Elektrické schéma magnetického obvodu

Na Obr. 5.2 je elektrické schéma magnetického obvodu pro měření střídavého proudu pomocí senzoru, který využívá Wiegandův efekt. Jde o sériové spojení magnetického odporu jádra a magnetického odporu vzduchové mezery. Při vložení senzoru do vzduchové mezery dojde ke změně odporu  $R_{mv}$  a také magnetické indukce. Toto není při výpočtech uvažováno.

Pro výpočet potřebných parametrů je potřeba znát velikost magnetické indukce, které je potřeba dosáhnout ve vzduchové mezeře. Použitý senzor využívající Wiegandova efektu vygeneruje na svém výstupu dostatečně velký impuls při působení magnetického pole o velikosti 10 gaussů. Pro převod magnetické indukce mezi jednotkami Gauss a Tesla je následující

$$B[T] = B[Gs] \cdot 10^{-4} = 10 \cdot 10^{-4} = 0,001 \text{ T} \quad (5.1)$$

kde  $B[T]$  je hodnota magnetické indukce v jednotkách Tesla,  $B [Gs]$  je hodnota magnetické indukce v jednotkách Gauss. Potřebná magnetická indukce, která je potřebná pro správnou funkci senzoru je 0,001 Tesla

Další parametr je délka střední indukční čáry v jádru z transformátorových plechů. Délku střední indukční čáry vypočítáme z geometrických rozměrů jádra. Rovnice (5.2)

$$l_f = 11 + 27 + 35 + 27 + 11 = 111 \text{ mm} \quad (5.2)$$

kde  $l_f$  je délka střední indukční čáry spočítaná z geometrických rozměrů jádra.

Další parametry pro výpočty jsou velikost vzduchové mezery  $l_v = 0,013 \text{ m}$ , permeabilita vakua  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ , permeabilita transformátorových plechů je závislá na velikosti magnetické indukce a určí se podle magnetizační křivky materiálu. Magnetická indukce je podle rovnice (5.3) závislá na permeabilitě použitého materiálu a na intenzitě magnetického pole.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (5.3)$$

kde  $B$  je magnetická indukce,  $\mu_r$  je permeabilita materiálu,  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $H$  intenzita magnetického pole.

Po aproximaci magnetizační křivky vypočítáme ze vztahu (5.4) permeabilitu transformátorových plechů.

$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0} = \frac{0,001}{0,397 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 2000 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.4)$$

Nyní sestavíme pro tento magnetický obvod rovnici, která zahrne všechny prvky v obvodu.

$$U_{mn} = N \cdot I = U_{mf} + U_{mv} \quad (5.5)$$

kde  $U_{mn}$  je magnetické napětí vytvořené budící cívkou,  $N$  je počet závitů budící cívky,  $I$  je proud protékající budící cívkou,  $U_{mf}$  je magnetické napětí na rezistoru, který představuje jádro,  $U_{mv}$  je napětí na rezistoru, který představuje vzduchovou mezeru.

Z těchto parametrů je potřeba vypočítat potřebný počet závitů budící cívky v závislosti na maximální hodnotě budícího proudu, aby bylo při maximální hodnotě budícího proudu dosaženo ve vzduchové mezeře magnetické indukce 10 Gauss.

$$N \cdot I = U_{mf} + U_{mv} = H_f \cdot l_f + H_v \cdot l_v \quad (5.6)$$

kde  $H_f$  je intenzita magnetického pole v jádře,  $l_f$  je délka střední indukční čáry,  $H_v$  je intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře,  $l_v$  je velikost vzduchové mezery. Podle vzorce (5.7) a (5.8) vypočítáme požadovanou velikost intenzity magnetického pole v jádře a ve vzduchové mezeře.

$$H_f = \frac{B_f}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{0,001}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000} = 0,398 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.7)$$

$$H_v = \frac{B_v}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{0,001}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} = 795,77 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.8)$$

Nyní vypočteme potřebný počet závitů budící cívky při budícím proudu 1 A. Počet závitů spočítáme podle vzorce (5.9).

$$N = \frac{H_f \cdot l_f + H_v \cdot l_v}{I} = \frac{0,398 \cdot 0,111 + 795,77 \cdot 0,013}{1} = 10,39 \doteq 10 \text{ závitů} \quad (5.9)$$

kde N je počet závitů budící cívky,  $H_f$  je intenzita magnetického pole v jádře,  $l_f$  je délka střední indukční čáry,  $H_v$  je intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře,  $l_v$  je velikost vzduchové mezery a I je proud budící cívky.

Pomocí vztahu (5.10) vytvoříme tabulku, ve které je uveden potřebný proud protékající budící cívkou v závislosti na počtu závitů cívky. Změnou počtu závitů lze měnit měřicí rozsah ampérmetru.

$$I = \frac{10,389188}{N} \quad (5.10)$$

Tab. 5.1 Závislost budícího proudu na počtu závitů cívky.

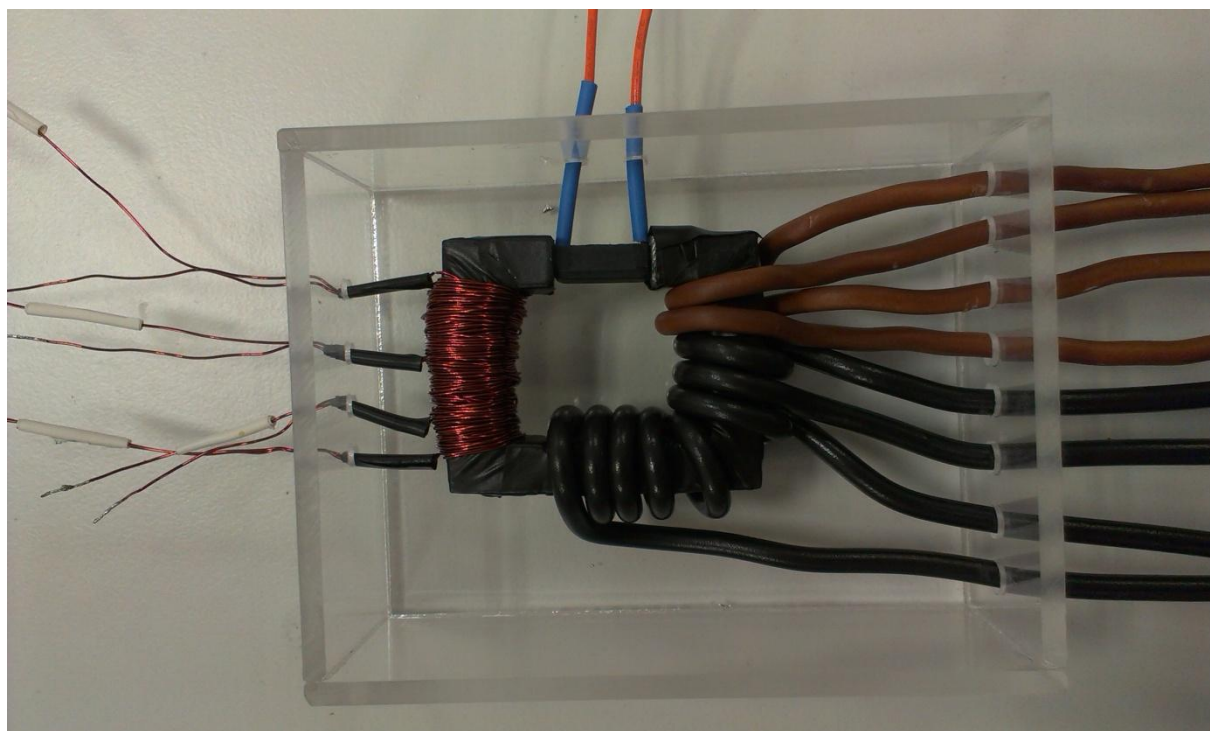
Počet závitů budící cívky [-]	Velkost budícího proudu [A]
100	0,1039
50	0,2078
20	0,5195
15	0,6926
10	1,0390
2	5,1946
1	10,3892



### 5.3 Cívky navinuté na jádru a jeho mechanická stabilizace

Z důvodu měření stejnosměrných proudů byly navinuty čtyři pomocné cívky, které slouží ke generování střídavého magnetického pole. Cívky byly navinuty s 10, 20, 50 a 100 závitů, jednotlivé cívky je možné libovolně spojovat podle potřeby. Tyto cívky jsou navinuty z lakovaného měděného drátu o průměru 0,35 mm, tento průměr je dostačující vzhledem k výkonovým možnostem generátoru a k počtu závitů navinutých cívek.

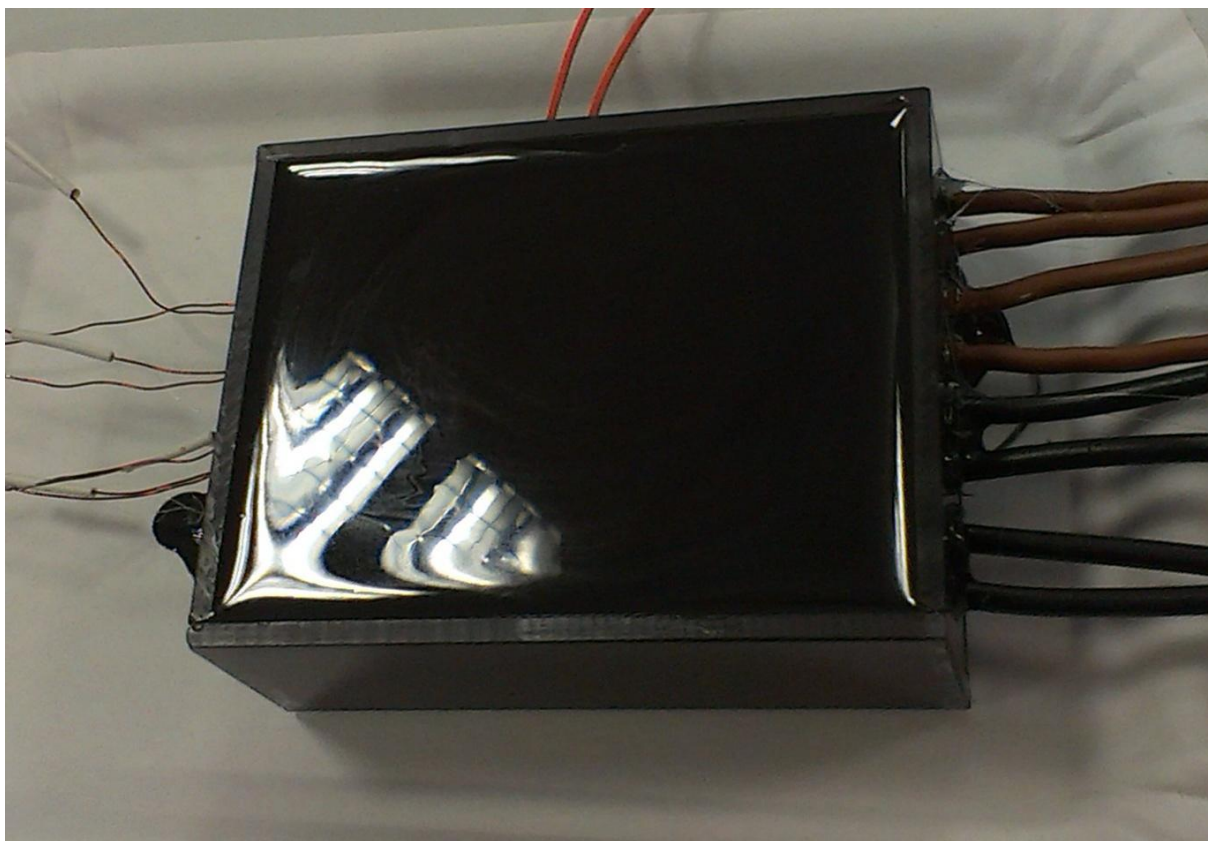
Jako hlavní vinutí, kterým protéká měřený proud, je použit měděný drát o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$ , maximální proud protékající tímto vodičem je 20 A. Jsou navinuty cívky s počtem závitů 1, 1, 2 a 6. Sériovým zapojením těchto cívek lze vytvořit cívku s deseti závitů. Jednotlivé počty závitů měřicí cívky slouží jako měřicí rozsahy proudu. Podle tabulky Tab. 5.1 lze s těmito rozsahy měřit proudy od 1 A do 10 A. Tyto hodnoty jsou pouze teoretické a skutečný rozsah měřených proudů je větší, to je uvedeno v kapitole 6 Měření stejnosměrného proudu. Cívky navinuté na jádru jsou zobrazeny na obrázku Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Cívky navinuté na jádře

### 5.3.1 Mechanická stabilizace

Jako mechanická stabilizace jádra cívky a senzoru umístěného ve vzduchové mezeře bylo zvoleno zalití polyuretanovou zalévací hmotou pro elektrotechniku ELCHEMCO PU 501 LR. Tato hmota se vyznačuje vysokou pracovní teplotou, která je až 130 °C, objemová rezistivita je 1 až  $3 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ , dielektrická pevnost je 17 - 21 kV  $\cdot \text{mm}^{-1}$ . Těchto vlastností je dosaženo po vytvrzení hmoty. Kompletní měřicí obvod byl zalit do krabičky z plexiskla černou zalévací hmotou. Zalitý senzor je zobrazen na obrázku Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Zalitý senzor proudu

## 5.4 Tvarovač výstupního impulsu

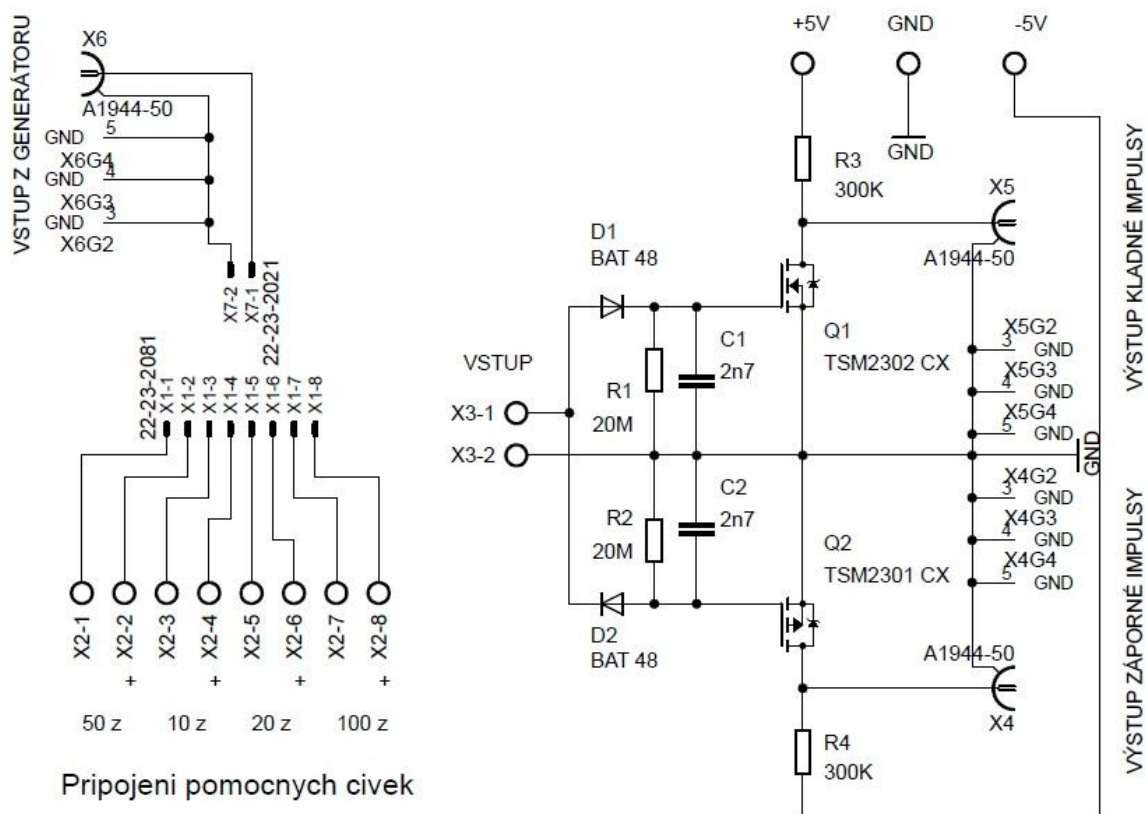
Vzhledem ke změnám tvaru výstupního impulsu wiegandova senzoru v závislosti na velikosti měřeného proudu bylo nutné na výstupu senzoru použít tvarovač výstupního impulsu. Výsledný impuls je vhodný pro další zpracování elektronikou. Při návrhu tvarovače bylo použito doporučené zapojení od výrobce senzoru, které je zobrazeno na obrázku Obr. 1.5. Schéma bylo vytvořeno v programu EAGLE, kde byla následně vytvořena předloha pro výrobu DPS. Plošný spoj byl vyroben ve školní laboratoři. V návrhu byla uvažována co nejmenší složitost vzhledem k malému počtu použitých součástek, proto bylo zvoleno použití SMD součástek pro realizaci tvarovače. Byly realizovány obě větve tvarovače pro zpracování kladných i záporných impulsů senzoru. Některé součástky nebyly dostupné, proto byly nahrazeny součástkami se stejnými parametry. Nahrazen byl tranzistor NDS 331N, za který byl použit tranzistor TSM 2302CX RF pro kladný impuls a TSM 2301CX RF pro záporný impuls.

Jejich typická hodnota napětí pro otevření je 1 V pro TSM 2302CX RF a 0,9 V pro TSM 2301CX RF. Tato hodnota je dostačující vzhledem k velikosti výstupnímu impulsu, který dosahuje hodnoty 3 V. V zapojení jsou použity keramické kondenzátory a metalizované rezistory v pouzdrech 1206. Tranzistory jsou v pouzdrech SOT 23. Pro oddělení kladných a záporných impulsů do jednotlivých větví tvarovače byly použity diody BAT 54 v pouzdru SOT 23.

Na desku plošných spojů byly přidány jumpery pro jednoduché propojení pomocných cívek. Vstupy i výstupy jsou opatřeny BNC konektory pro jednoduché připojení generátoru a snímací elektroniky. Wiegandův senzor je připojen k plošnému spoji pomocí šroubovací svorkovnice. Měřený proud je přiveden vodiči upevněnými ve šroubovací svorkovnici. Jednoduchým propojením jednotlivých cívek lze dosáhnout požadovaného rozsahu měření.

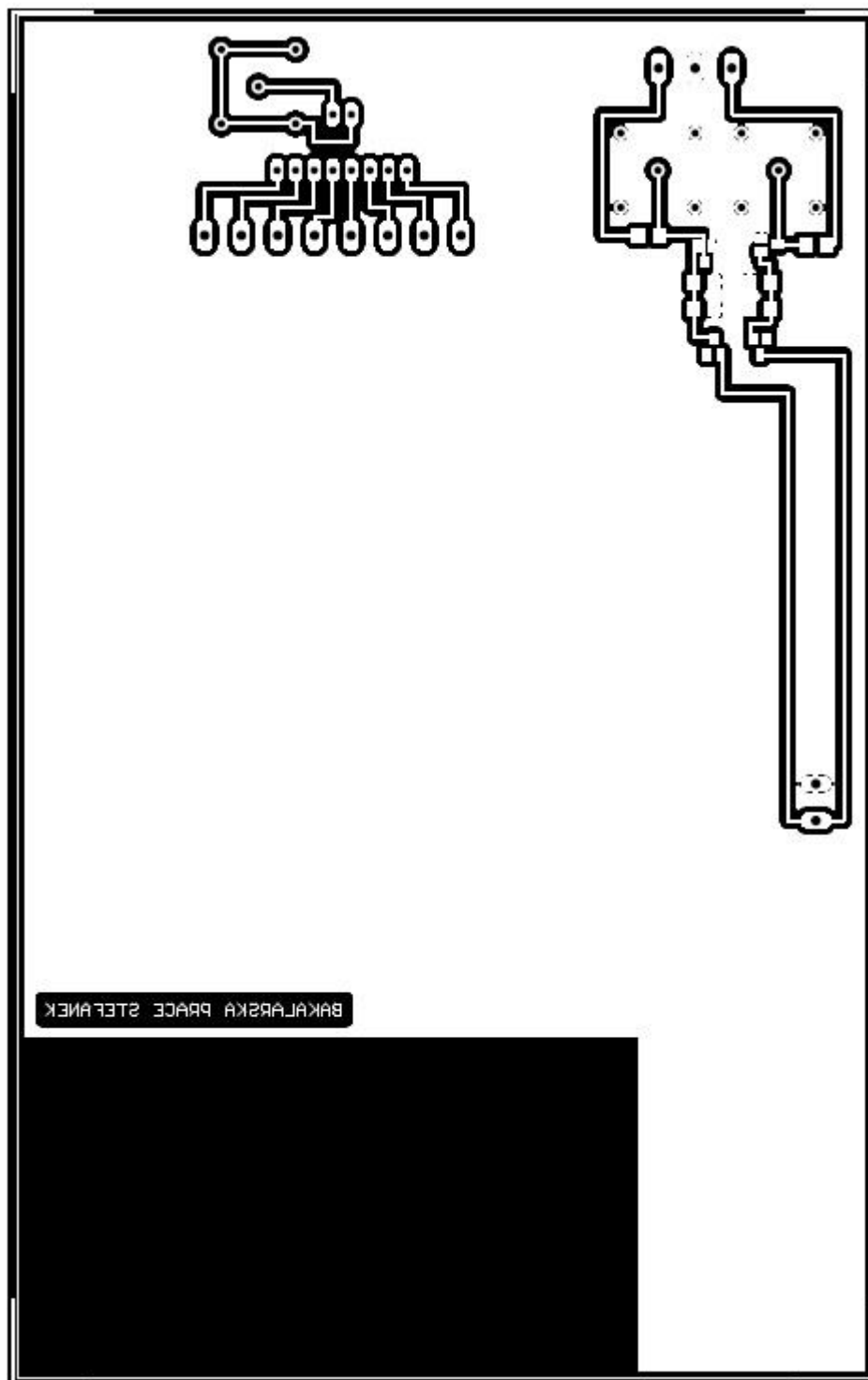
### 5.4.1 Návrh v programu EAGLE

Na obrázku Obr. 5.5 je zobrazeno elektrické schéma tvarovače impulsů. Ve schématu je zobrazeno zapojení a řazení pomocných cívek. Cívky musí být pospojovány se správným řazení začátků vinutí, v jiném případě nedojde k součtu jejich indukčnosti. Napájecí napětí tvarovače je  $\pm 5$  V. Toto napětí je ideální pro zpracování mikroprocesorem. Jako vstup je označena svorkovnice pro připojení wiegandova senzoru.



Obr. 5.5 Elektrické schéma tvarovače

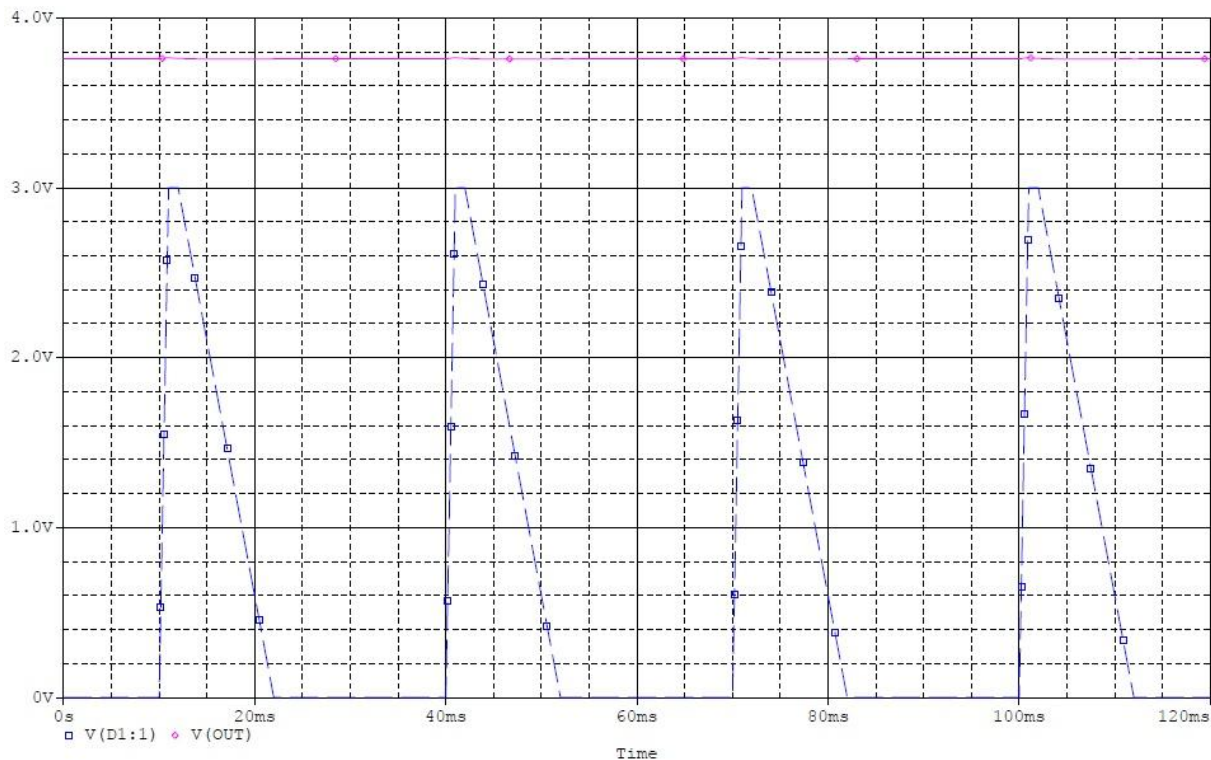
Na obrázku Obr. 5.6 je zobrazena předloha pro výrobu plošného spoje ze strany spojů v požadované úpravě. Invertování barev a zrcadlení. V levé dolní části plošného spoje je místo bez mědi pro upevnění svorkovnice pro připojení měřeného proudu.



Obr. 5.6 Předloha pro výrobu DPS v požadované úpravě

## 5.4.2 Simulace v programu ORCAD

Součástí zpracování byla simulace tvarovače při zpracování impulsu z wiegandova senzoru. Jako vstupní impuls byl použit impuls s náběžnou hranou délky 1 ms, maximální napětí bylo 3 V po dobu 1 ms, sestupná hrana po dobu 10 ms. Frekvence signálu byla 33,3 Hz.

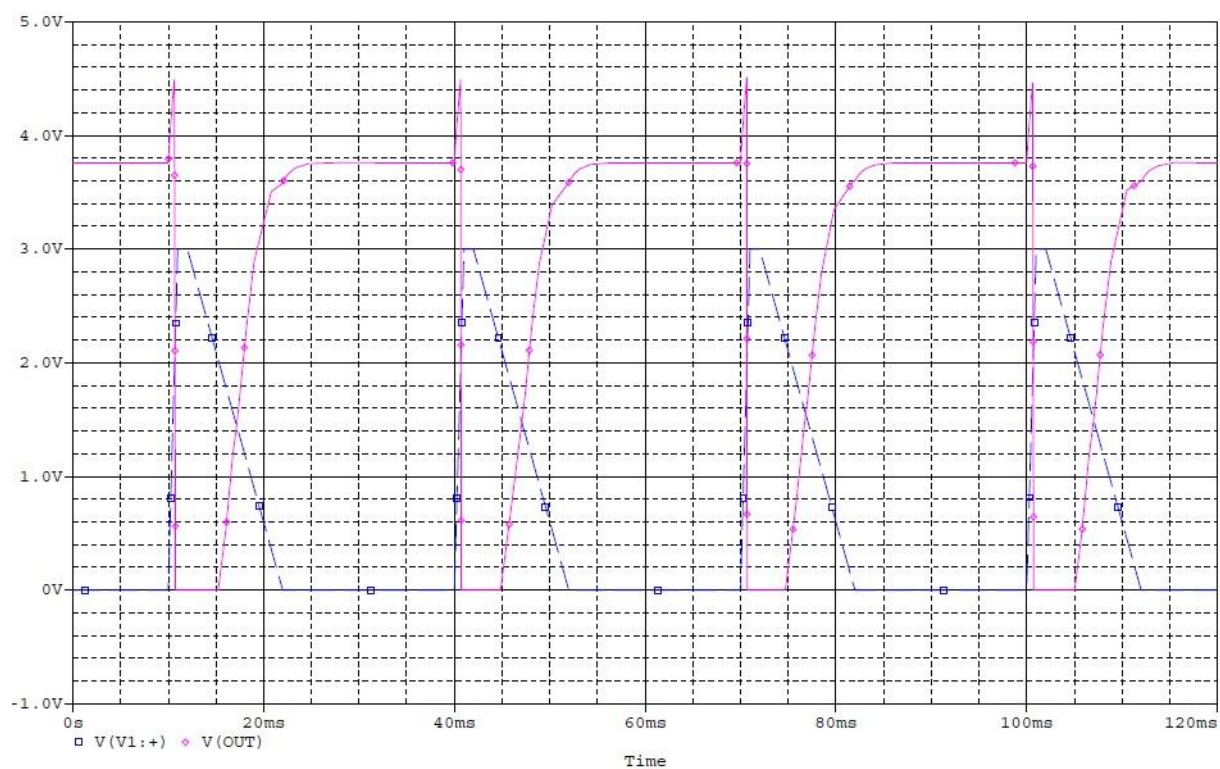


Obr. 5.7 Simulace tvarovače s použitím vstupní diody

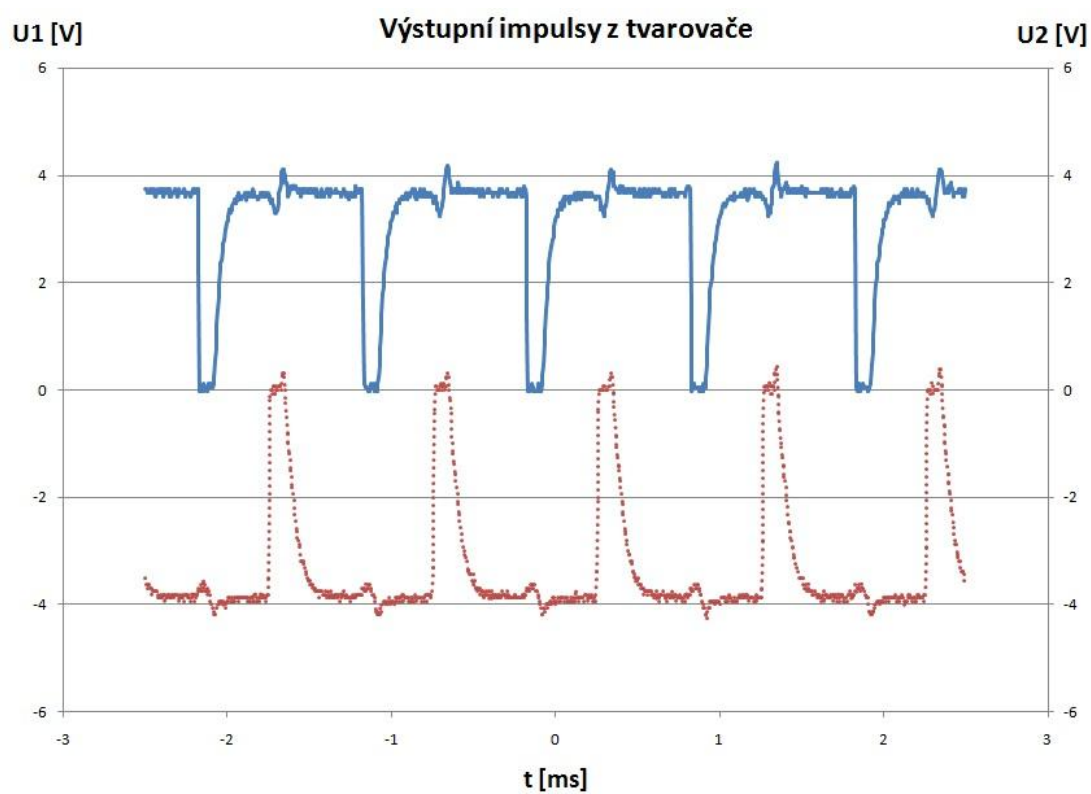
Z obrázku Obr. 5.7 je vidět, že vstupní impuls neprojde přes vstupní diodu, která odděluje kladné a záporné impulsy do jednotlivých větví. Vstupní impuls je vykreslen přerušovanou čarou a výstupní plnou. Z tohoto důvodu byla po ověření správné činnosti tvarovače bez diody, dioda z plošného spoje odstraněna. Odstranění diody nezpůsobuje problémy při otvírání tranzistorů, protože se tranzistor v kladné větvi tvarovače neotevře záporným impulsem.

Na obrázku Obr. 5.8 je zobrazen vstupní a výstupní impuls tvarovače. Vstupní impuls je vykreslen přerušovanou čarou. Bez použití vstupní diody projde vstupní impuls přes tvarovač. Výsledný výstupní impuls je podobný impulsu naměřenému, který je zobrazen na obrázku Obr. 5.9. Na obrázku jsou zobrazeny kladné i záporné impulsy, oba impulsy jsou generovány wiegandovým senzorem při napětí generátoru 20 V s frekvencí 1 kHz, pomocná cívka se 150 závitů a nulový měřený proud. Kladné impulsy jsou označeny jako U1 a záporné jako U2.





Obr. 5.8 Simulace tvarovače bez vstupní diody



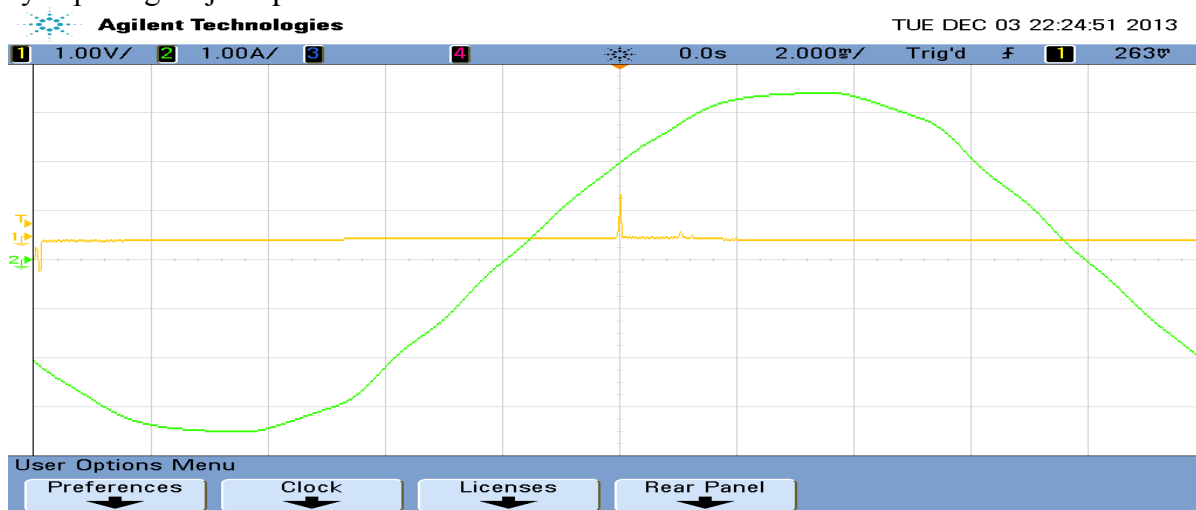
Obr. 5.9 Výstupní impulsy tvarovače

## 5.5 Ověření funkce senzoru a magnetického obvodu

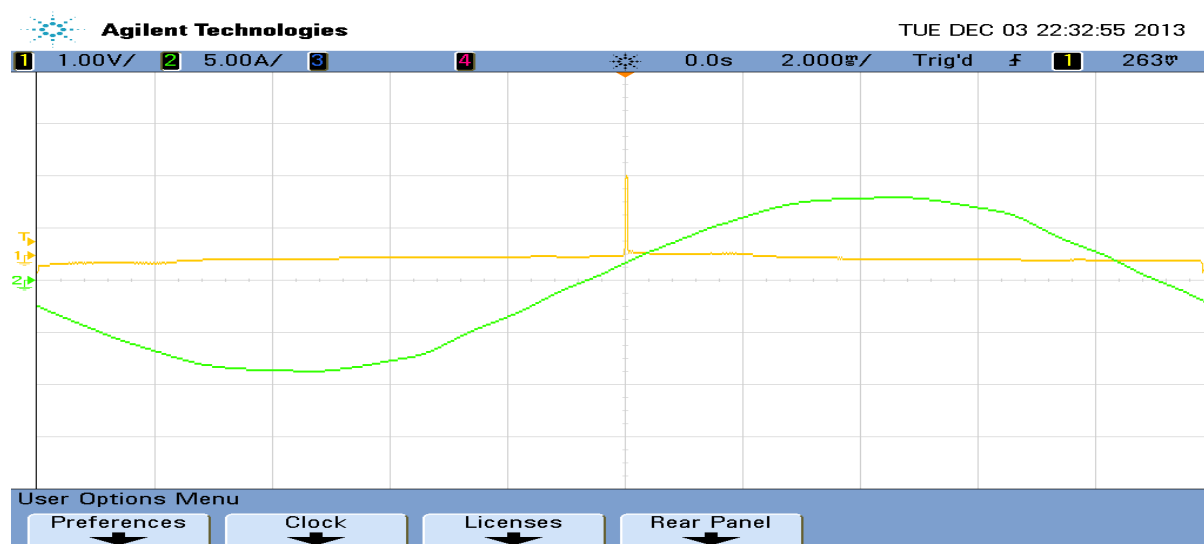
V následující kapitole jsou zobrazeny výsledky experimentálního měření.

Pro měření výstupní charakteristiky senzoru bylo zapojení následující. Senzor byl umístěn do vzduchové mezery jádra. Na jádro bylo navinuta cívka se sedmi závity. Cívka byla přes ochranný rezistor připojena ke generátoru střídavého napětí. Výstup senzoru byl připojen na digitální osciloskop. Na vstupní vodič cívky byla umístěna bezkontaktní sonda, která snímala protékající proud. Sonda byla připojena na druhý kanál osciloskopu. Na osciloskopu jsou tedy zobrazeny dva průběhy. Jeden průběh je vstupní proud do cívky a druhý je výstupní impuls senzoru.

Na Obr. 5.10 je vidět výstupní charakteristika při vstupním proudu 2 A. Na Obr. 5.11 je vidět výstupní charakteristika při vstupním proudu 6 A. Vstupní signál má sinusový průběh, výstupní signál je impuls.



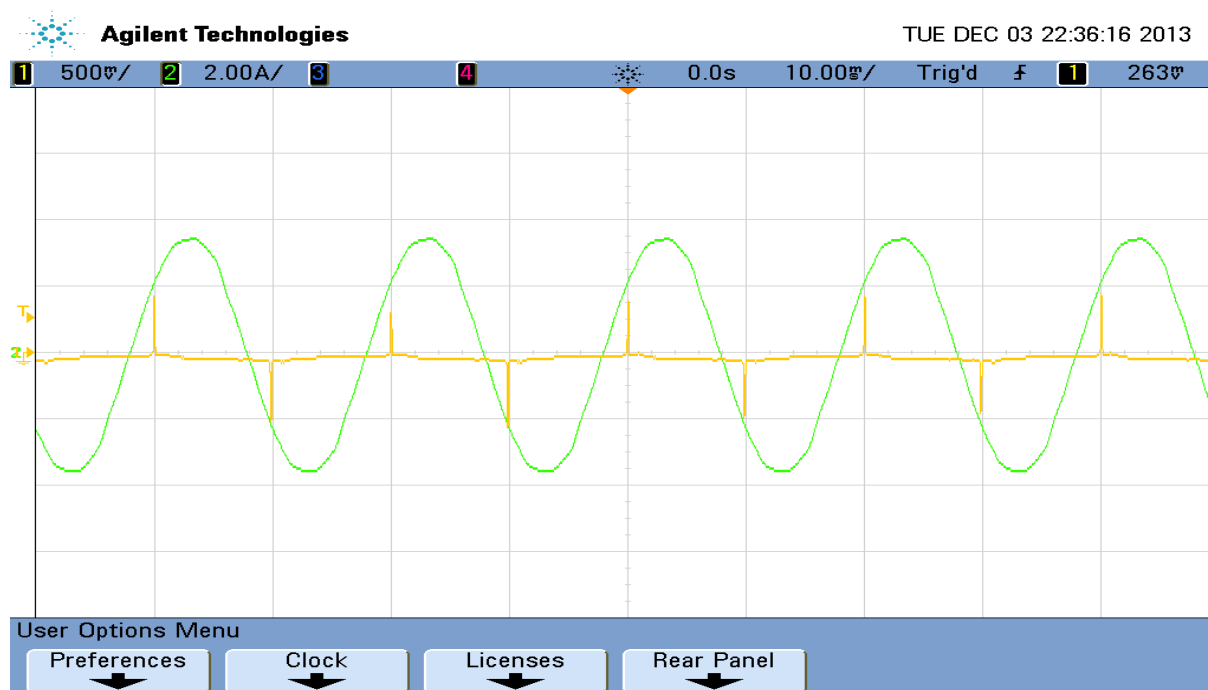
Obr. 5.10 Vstupní a výstupní signál při vstupním proudu 2 A



Obr. 5.11 Vstupní a výstupní signál při vstupním proudu 6 A

Z obrázků je patrné, že doba potřebná k vygenerování impulsu se zmenšuje se zvyšujícím se proudem, který protéká budící cívkou. Doba k vygenerování impulsu se počítá od doby, kdy má vstupní proud nulovou úroveň.

Na Obr. 5.12 je zobrazeno pět period vstupního proudu. Z obrázku je patrné, že výsledná polarita výstupního pulsu je závislá na tom, jestli je vstupní proud kladný nebo záporný. Při vstupním proudu kolem 3,5 A má výstupní impuls napětí mezi 400 a 500 mV. Velikost výstupního impulsu se nemění. Pro stejnou velikost vstupního proudu je výstupní signál generován ve stejnou dobu. Pro měření je lepší použít kladný impuls, proto je ve vyhodnocovací elektronice usměrňovací dioda, která propustí pouze kladné impulsy.



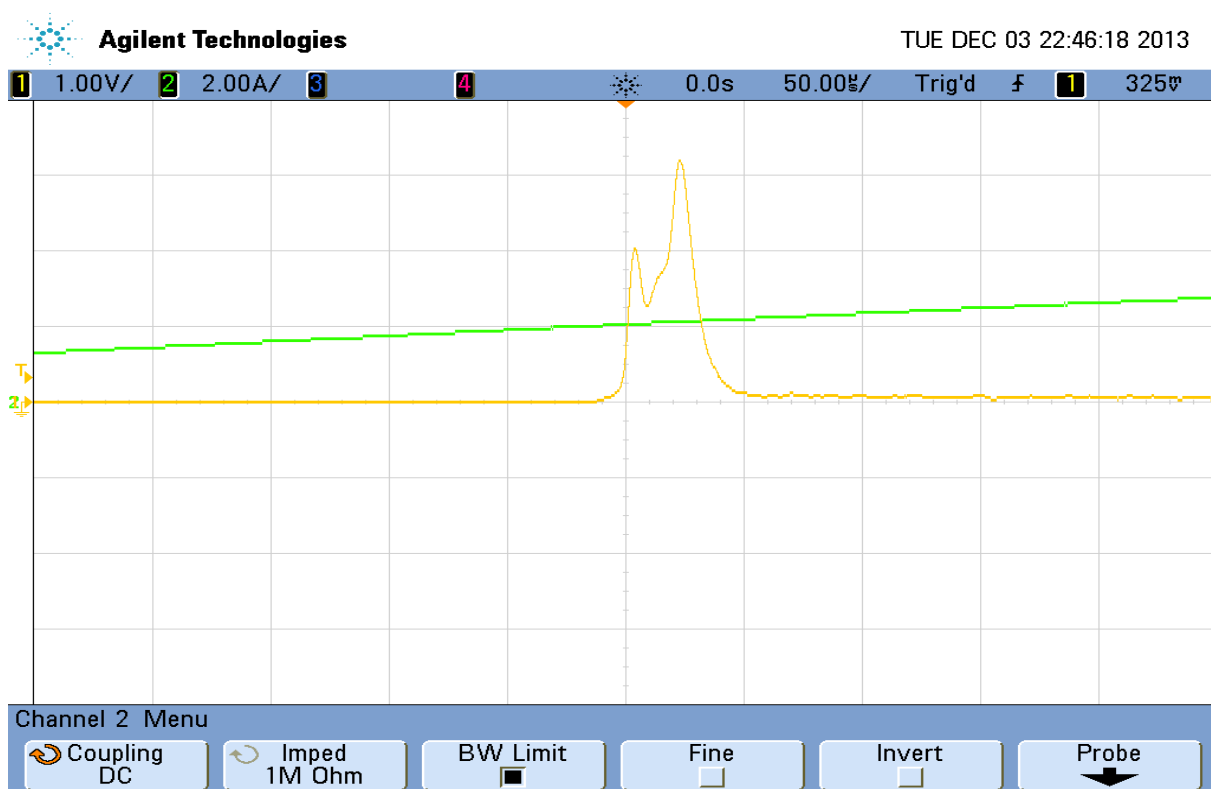
Obr. 5.12 Pět period vstupního signálu při proudu 2,5 A

Tento způsob měření je omezen velikostí vstupního proudu. Minimální vstupní proud se pohybuje kolem 1,25 A. Při této úrovni vstupního proudu dochází k deformaci výstupního signálu. Tento průběh je zobrazen na Obr. 5.13 K stejnému jevu dochází při překročení maximálního proudu, který je 6,2 A. Zobrazeno na Obr. 5.14. Tyto minimální a maximální hodnoty jsou vztaženy k cívce se sedmi závitů. Pokud bude cívka navinuta menším nebo větším počtem závitů, bude se měřící rozsah měnit.





Obr. 5.13 Výstupní impuls při vstupním proudu 1,25 A

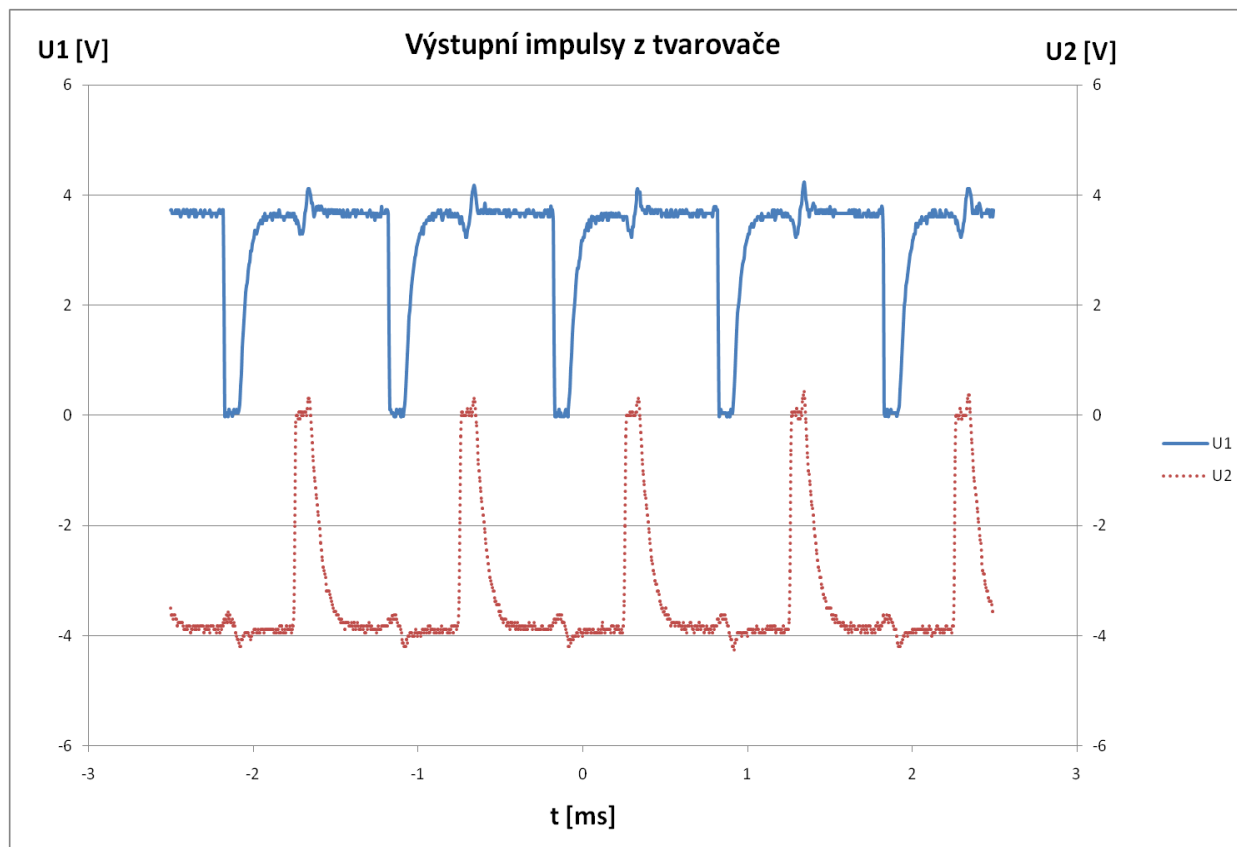


Obr. 5.14 Výstupní impuls při vstupním proudu 6,2 A

## 5.6 výstupní impulsy tvarovače

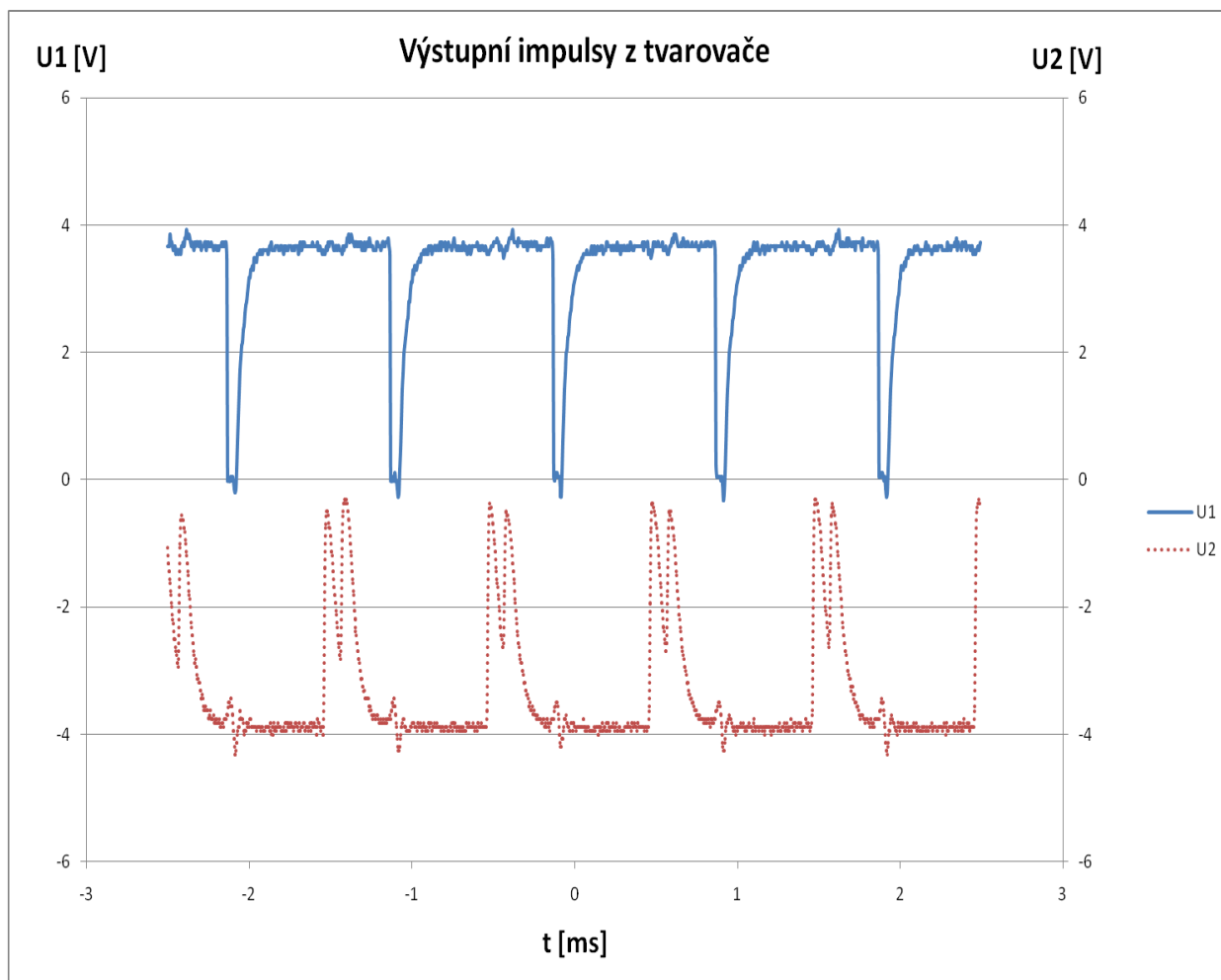
V této kapitole jsou uvedeny vybrané výstupní impulsy tvarovače, ze kterých se měří čas potřebný k vygenerování impulsu. Zobrazeny jsou i impulsy na okrajích převodní charakteristiky, kde už nemají ideální tvar. Ostatní obrázky jsou na přiloženém CD.

### 5.6.1 Porovnání kladných a záporných impulsů



Obr. 5.15 Kladné a záporné impulsy z tvarovače

Na obrázku Obr. 5.15 jsou kladné a záporné impulsy na výstupu tvarovače. Na pomocnou cívku byl přiveden harmonický signál s frekvencí 1 kHz a amplitudou 20 V<sub>pp</sub>. Pomocná cívka měla 150 závitů a měřicí 8 závitů, měřicí cívkou neprotékal proud.



Obr. 5.16 Kladné a záporné impulsy z tvarovače

Na obrázku Obr. 5.16 jsou kladné a záporné impulsy na výstupu tvarovače. Na pomocnou cívku byl přiveden harmonický signál s frekvencí 1 kHz a amplitudou 20 V<sub>pp</sub>. Pomocná cívka měla 150 závitů a měřicí 8 závitů, měřicí cívkou protékal proud 2 A. Z grafu vyplývá že při proudu 2 A dochází k deformaci záporného impulsu a proto je pro další zpracování vhodnější kladný impuls.

## 6 MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Tato kapitola je rozdělena do dvou částí, v kterých jsou popsány výsledky měření senzoru v nezalitém a zalitém stavu. Zapojení pro měření zůstává pro obě varianty stejné.

Pro měření stejnosměrného proudu bylo zapojení následující. Senzor byl umístěn do vzduchové mezery a mechanicky stabilizován lepidlem. K pomocným cívkám byl připojen generátor harmonického signálu. Napětí a frekvence generátoru se v průběhu měření mění v závislosti na požadovaných výstupních charakteristikách. Mění se i počet závitů pomocné i měřicí cívky. K měřicí cívkce byl přiveden proud ze stabilizovaného zdroje přes odpor simulující skutečnou zátěž. Výstup wiegandova senzoru byl připojen na vstup tvarovače. Výstupy tvarovače byly připojeny k digitálnímu osciloskopu. Výstup kladných impulsů byl připojen k čítači. Z generátoru byl k čítači přiveden synchronizační impuls. Doba mezi náběžnou hranou synchronizačního impulsu a sestupnou hranou výstupního impulsu tvarovače je doba potřebná k vygenerování impulsu a odpovídá měřenému proudu.

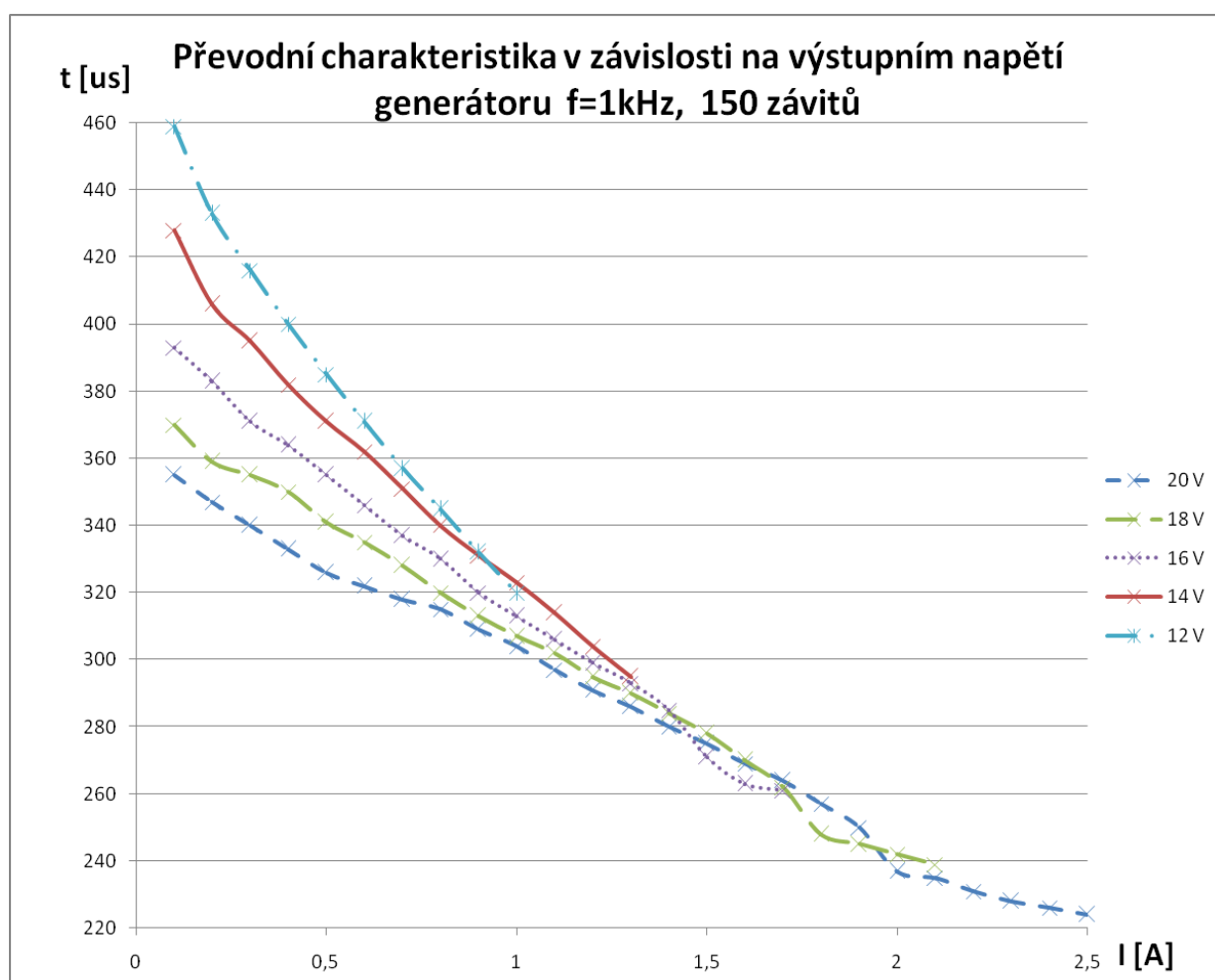
### 6.1 Měření nezalitého senzoru

Tab. 6.1 Tabulka naměřených hodnot převodní charakteristiky

I [A]	U <sub>gen</sub> [V]								
	20	19	18	17	16	15	14	13	12
0,1	355	361	370	374	393	406	428	451	459
0,2	347	353	359	369	383	392	406	436	433
0,3	340	345	355	359	371	381	395	412	416
0,4	333	338	350	353	364	373	382	398	400
0,5	326	332	341	347	355	365	371	385	385
0,6	322	326	335	339	346	352	362	371	371
0,7	318	323	328	331	337	342	351	360	357
0,8	315	318	320	323	330	335	340	349	345
0,9	309	312	313	316	320	325	331	339	332
1	304	305	307	309	313	317	323	328	320
1,1	297	299	302	303	306	311	314	319	
1,2	291	293	295	297	299	302	304	306	
1,3	286	287	290	291	293	294	295		
1,4	280	282	284	285	285	285			
1,5	275	276	278	278	271	275			
1,6	269	270	270	268	263				
1,7	264	263	262	255	261				
1,8	257	256	248	252					
1,9	250	241	245	249					
2	237	238	242						
2,1	235	235	239						
2,2	231	234							

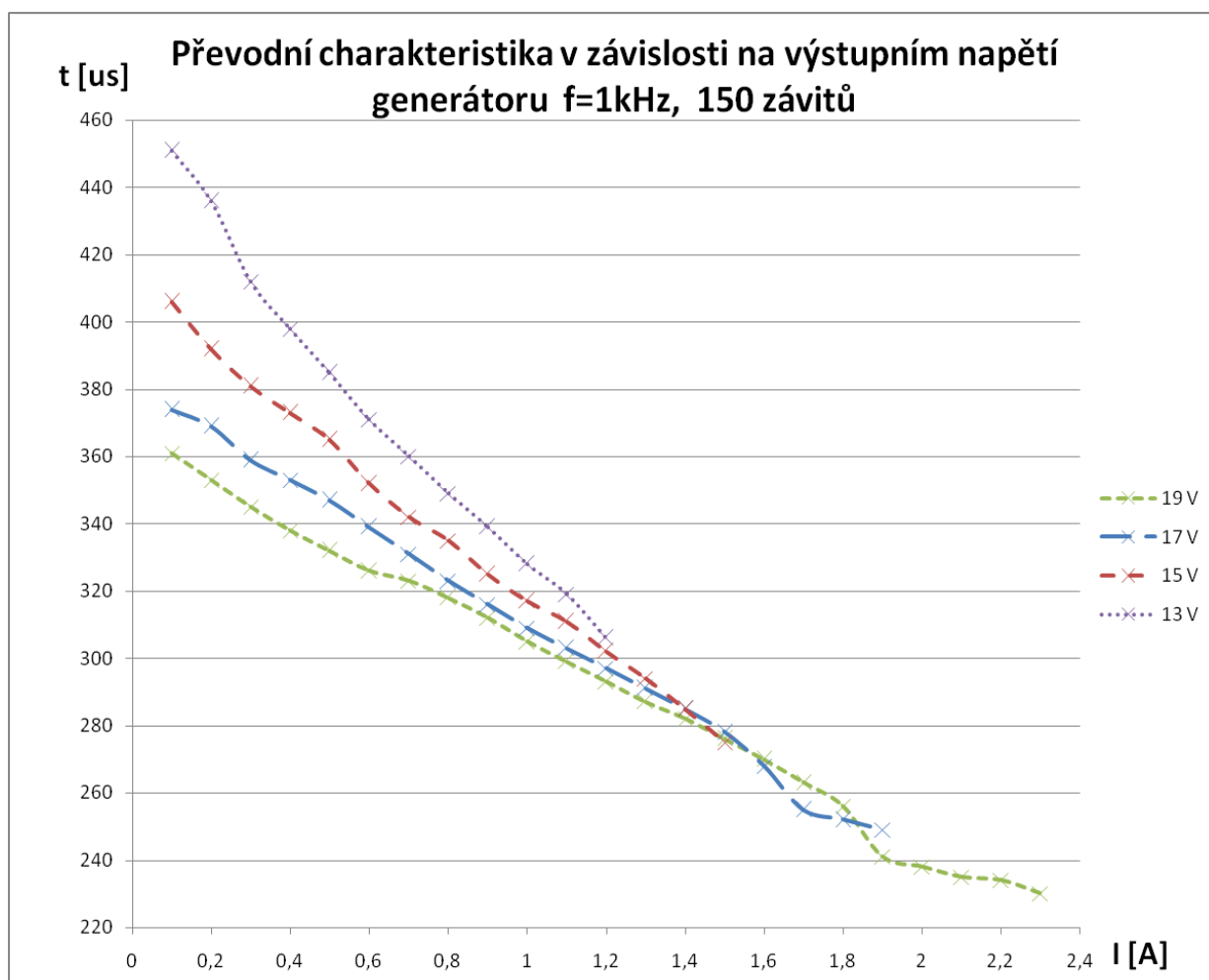
	U <sub>gen</sub> [V]								
I [A]	20	19	18	17	16	15	14	13	12
2,3	228	230							
2,4	226								
2,5	224								

V tabulce Tab. 6.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty převodní charakteristiky, která zobrazuje závislost doby, potřebné k vygenerování impulsu od nulové úrovně harmonického signálu, na zvoleném napětí generátoru a měřeném proudu. Potřebný čas je uveden v  $\mu\text{s}$ . Tyto hodnoty byly naměřeny při frekvenci generátoru 1 kHz, pomocná cívka měla 150 závitů, měřicí cívka 10 závitů, čítač byl nastaven na průměrování 100 vzorků. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do grafů.



Obr. 6.1 Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru

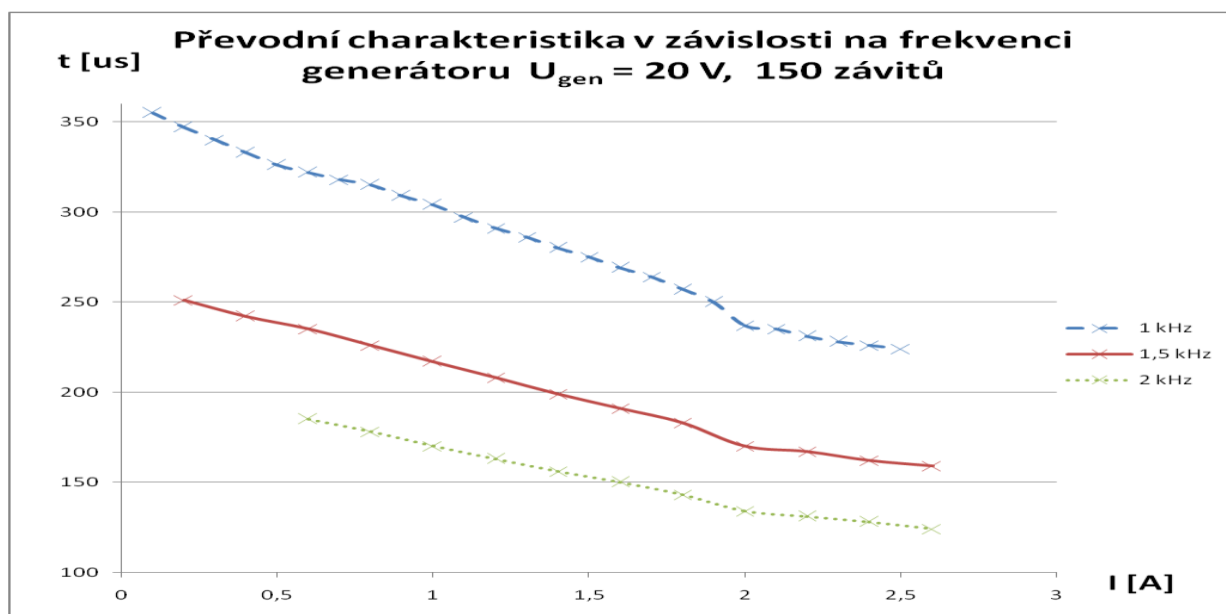
Na obrázku Obr. 6.1 je vidět, že pro výstupní napětí generátoru 20 V je převodní charakteristika pro proud od 0,8 do 1,8 A lineární. Vhodné bylo i napětí 19 V a 17 V, u kterého je ale menší měřicí rozsah. Ostatní napětí generátoru nevykazují takovou linearitu, proto výstupní napětí generátoru 20 V bylo zvoleno jako nejvhodnější pro měření proudu.



Obr. 6.2 Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru

Tab. 6.2 Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru

I [A]	U <sub>gen</sub> = 20 V		
	f= 1 kHz	f= 1,5 kHz	f= 2 kHz
0,2	347	251	
0,4	333	242	
0,6	322	235	185
0,8	315	226	178
1	304	217	170
1,2	291	208	163
1,4	280	199	156
1,6	269	191	150
1,8	257	183	143
2	237	170	134
2,2	231	167	131
2,4	226	162	128
2,6		159	124



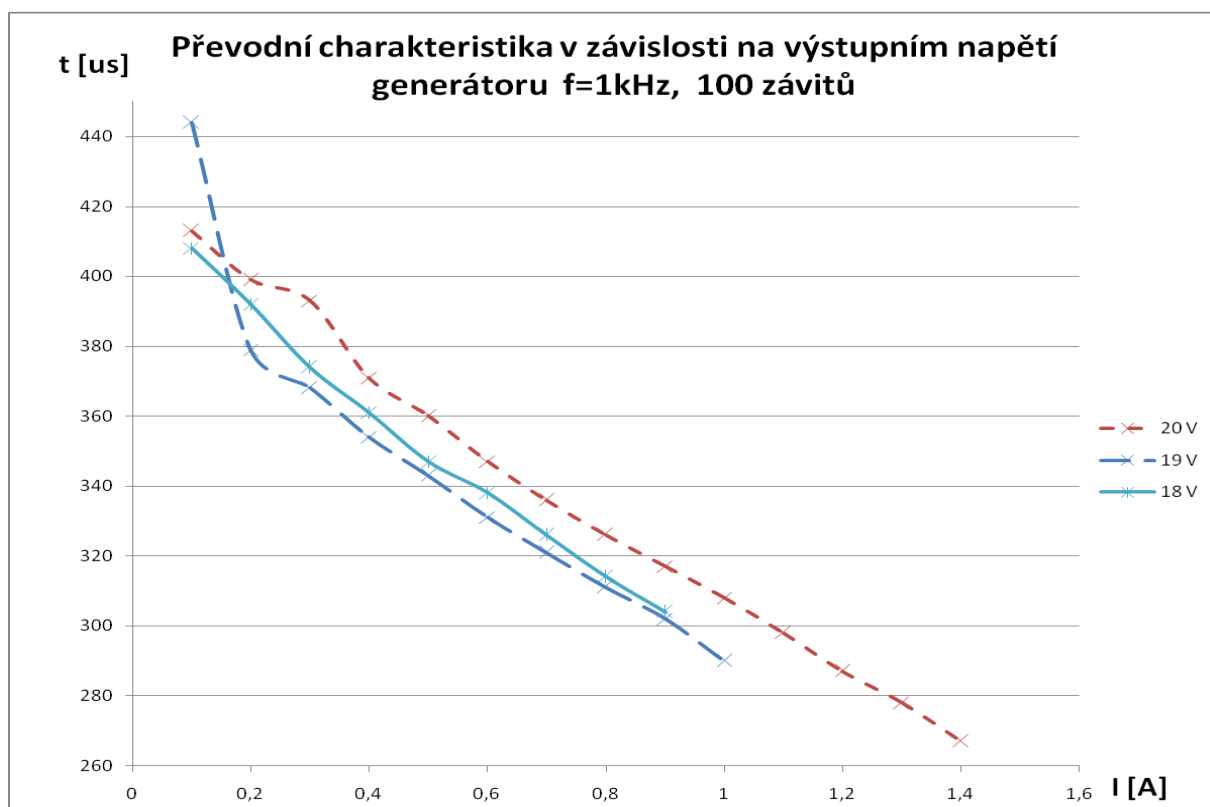
Obr. 6.3 Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru

Z obrázku Obr. 6.3 je vidět, že převodní charakteristika je frekvenčně závislá. S rostoucí frekvencí se zmenšuje měřící rozsah a strmost charakteristiky se zmenšuje. To je způsobeno závislostí impedance cívky na frekvenci, s rostoucí frekvencí impedance stoupá a je tedy nutné cívku více budit.

Tab. 6.3 Převodní charakteristika při 100 závitěch pomocné cívky

I [A]	U <sub>gen</sub> [V]		
	20	19	18
0,1	413		
0,2	399		
0,3	393	444	408
0,4	371	379	392
0,5	360	368	374
0,6	347	354	361
0,7	336	343	347
0,8	326	331	338
0,9	317	321	326
1	308	311	314
1,1	298	302	304
1,2	287	290	
1,3	278		
1,4	267		

V tabulce Tab. 6.3 jsou uvedeny naměřené hodnoty převodní charakteristiky pro 100 závitů pomocné cívky. Z naměřených hodnot lze vidět, že došlo ke zmenšení měřícího rozsahu a také se zmenšil rozsah napětí generátoru, které vybudí dostatečné magnetické pole. Zmenšením počtu závitů cívky dojde ke zmenšení indukce cívky a tím ke zmenšení intenzity magnetického pole a měřícího rozsahu. Strmost převodní charakteristiky je proti 150 závitům větší.



Obr. 6.4 Převodní charakteristika pro 100 závitů pomocné cívky

Tab. 6.4 Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření

	jednotlivé měření									
$I$ [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	353	355	353	354	342	352	353	353	354	342
0,2	349	346	347	348	346	345	349	348	345	346
0,3	338	338	340	338	338	339	342	338	338	339
0,4	331	332	332	331	333	332	332	332	333	332
0,5	326	327	326	327	326	327	326	326	326	326
0,6	322	321	322	322	322	323	322	322	322	322
0,7	317	317	317	317	317	317	317	318	317	316
0,8	313	313	313	313	312	313	313	314	313	313
0,9	308	307	308	308	307	308	307	308	308	308
1	303	303	303	303	302	303	303	303	303	303
1,1	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296
1,2	290	290	290	290	290	290	290	290	290	290
1,3	283	284	284	283	283	283	284	284	284	284
1,4	279	279	278	279	278	279	278	278	279	278
1,5	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273
1,6	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268
1,7	262	262	262	263	262	262	262	262	262	262
1,8	257	257	257	257	256	257	257	257	257	257



	jednotlivé měření									
I [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,9	250	250	251	250	250	250	250	250	250	250
2	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236
2,1	232	233	232	232	234	234	232	233	232	233
2,2	230	230	229	229	230	230	230	230	230	230
2,3	223	227	227	227	227	227	227	226	227	227
2,4	224	225	225	225	224	224	224	224	225	224
2,5	226	222	222	222	221	222	222	222	222	222
2,6	225	220	224	220	221	225	224	225	228	220

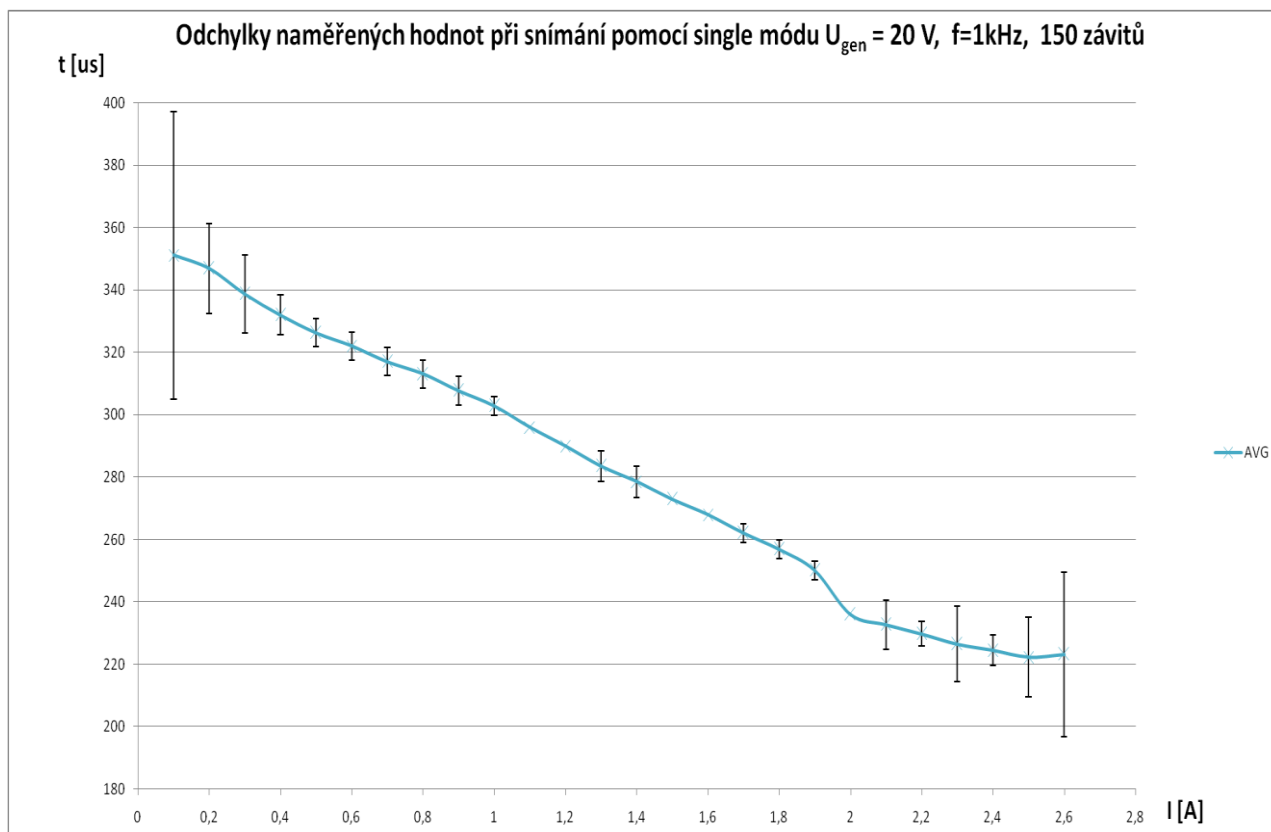
V tabulce Tab. 6.4 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro jednotlivá měření v single módu, průměrování je vypnuté, z těchto hodnot byly vypočítány směrodatné odchylky. Tyto odchylky jsou zobrazeny jako chybové úsečky v grafu na obrázku Obr. 6.5, křivku tvoří průměr deseti naměřených hodnot. Odchylky jsou pro účely lepšího zobrazení desetkrát zvětšeny. Odchylky v lineární části převodní jsou velmi malé, větší jsou pro proudy menší než 1 A a větší než 1,9 A.

Jedná se o nejistotu měření typu A. Nejistota typu A vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Odhad výsledné hodnoty pro počet měření  $n$  je vyjádřen aritmetickým průměrem. Ten je vypočítán podle vzorce (6.1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

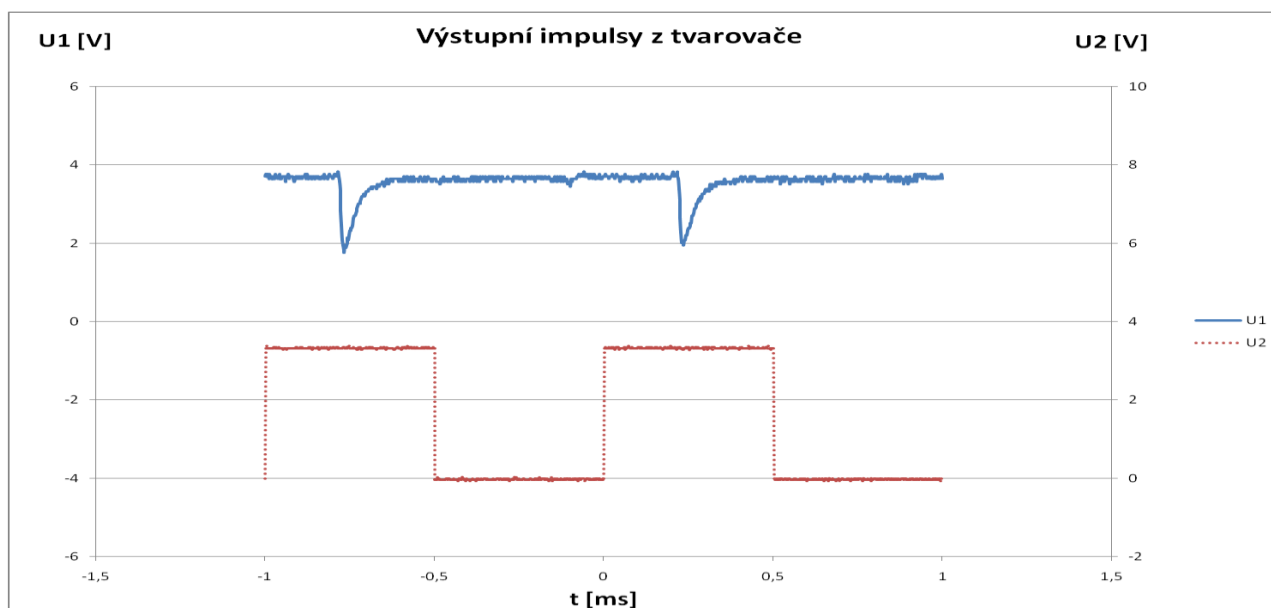
Nejistota tohoto odhadu se určí jako výběrová směrodatná odchylka této hodnoty podle vztahu (6.2).

$$u_{Ax} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$



Obr. 6.5 Odchylky naměřených hodnot

Větší odchylky při malých proudech od 0,1 do 1 A a větších proudech od 2 A do 2,6 A jsou způsobeny tvarem výstupního impulsu. Výstupní impuls při proudu 2,5 A je zobrazen na obrázku Obr. 6.6. Z toho obrázku je vidět, že výstupní impuls není tak velký jako je tomu při nulovém proudu, což je uvedeno na obrázku Obr. 5.15.



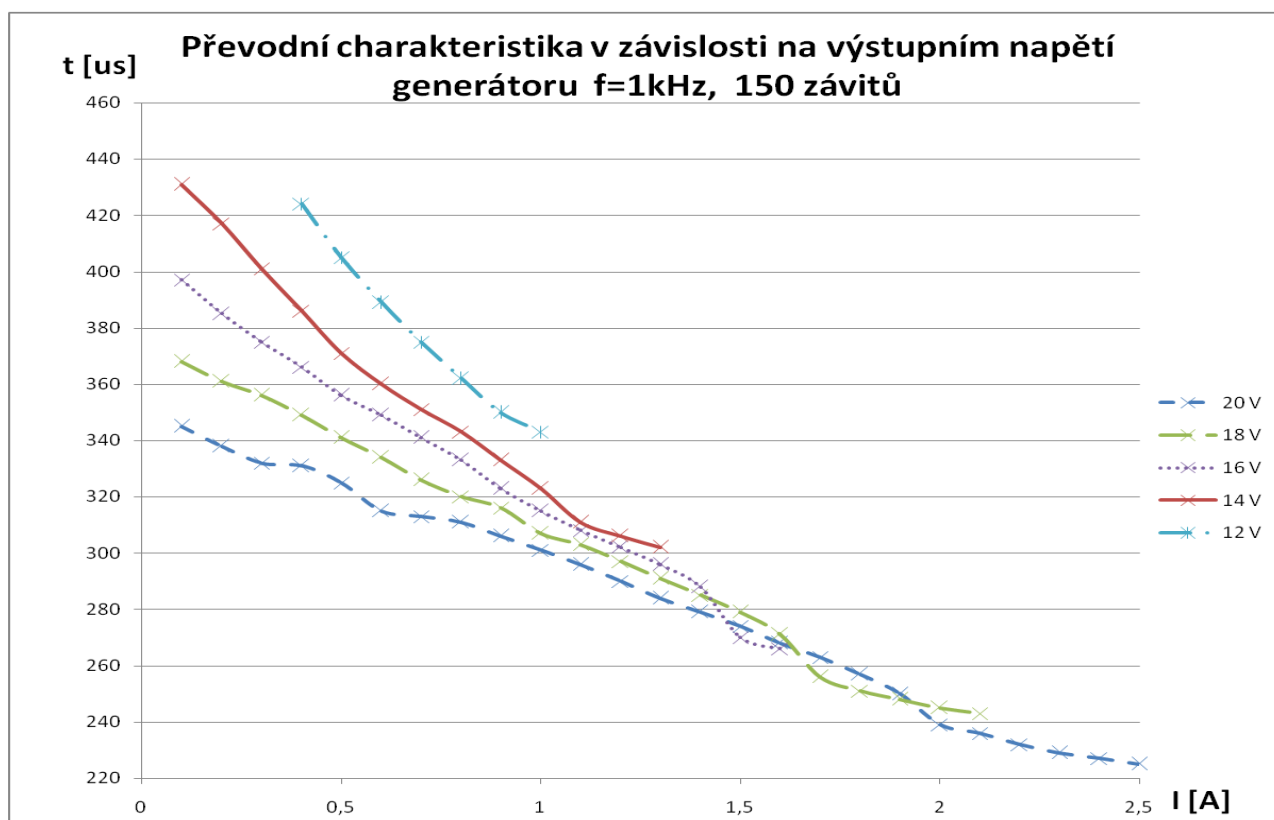
Obr. 6.6 Výstupní impuls  $U1$  a synchronizační impuls  $U2$  při proudu 2,5 A

## 6.2 Měření zalitého senzoru

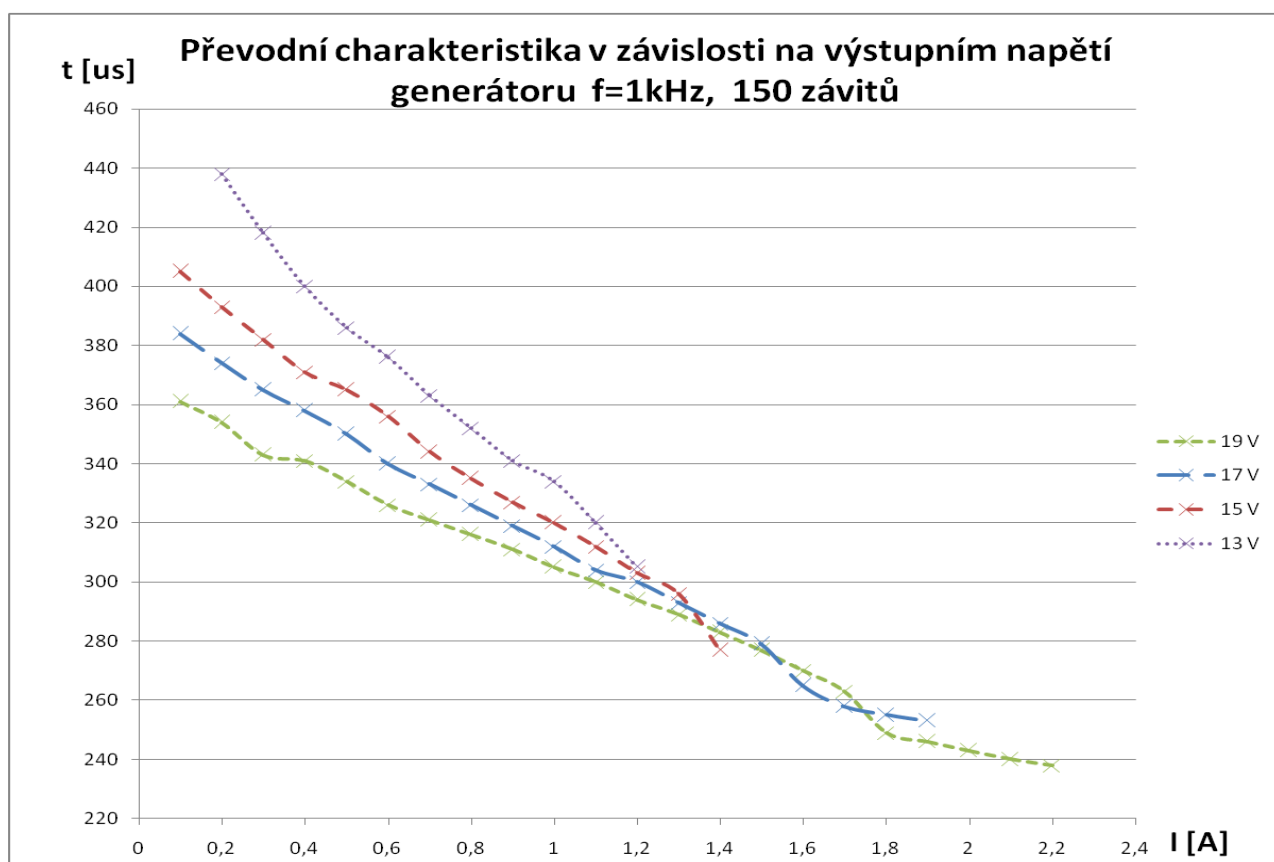
Tab. 6.5 Tabulka naměřených hodnot převodní charakteristiky

	U <sub>gen</sub> [V]								
I [A]	20	19	18	17	16	15	14	13	12
0,1	345	361	368	384	397	405	431		
0,2	338	354	361	374	385	393	417	438	
0,3	332	343	356	365	375	382	401	418	
0,4	331	341	349	358	366	371	386	400	424
0,5	325	334	341	350	356	365	371	386	405
0,6	315	326	334	340	349	356	360	376	389
0,7	313	321	326	333	341	344	351	363	375
0,8	311	316	320	326	333	335	343	352	362
0,9	306	311	316	319	323	327	333	341	350
1	301	305	307	312	315	320	323	334	343
1,1	296	300	303	304	308	312	311	320	
1,2	290	294	297	300	302	303	306	305	
1,3	284	289	291	293	296	296	302		
1,4	279	283	285	286	288	277			
1,5	274	277	279	279	270				
1,6	268	270	271	265	266				
1,7	263	263	256	258					
1,8	257	249	251	255					
1,9	250	246	248	253					
2	239	243	245						
2,1	236	240	243						
2,2	232	238							
2,3	229								
2,4	227								
2,5	225								

V tabulce Tab. 6.5 jsou uvedeny naměřené hodnoty převodní charakteristiky zalitého senzoru, která zobrazuje závislost doby, potřebné k vygenerování impulsu od nulové úrovně harmonického signálu, na zvoleném napětí generátoru a měřeném proudu. Potřebný čas je uveden v  $\mu\text{s}$ . Tyto hodnoty byly naměřeny při frekvenci generátoru 1 kHz, pomocná cívka měla 150 závitů, měřicí cívka 10 závitů, čítač byl nastaven na průměrování 100 vzorků. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do grafů.



Obr. 6.7 Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru

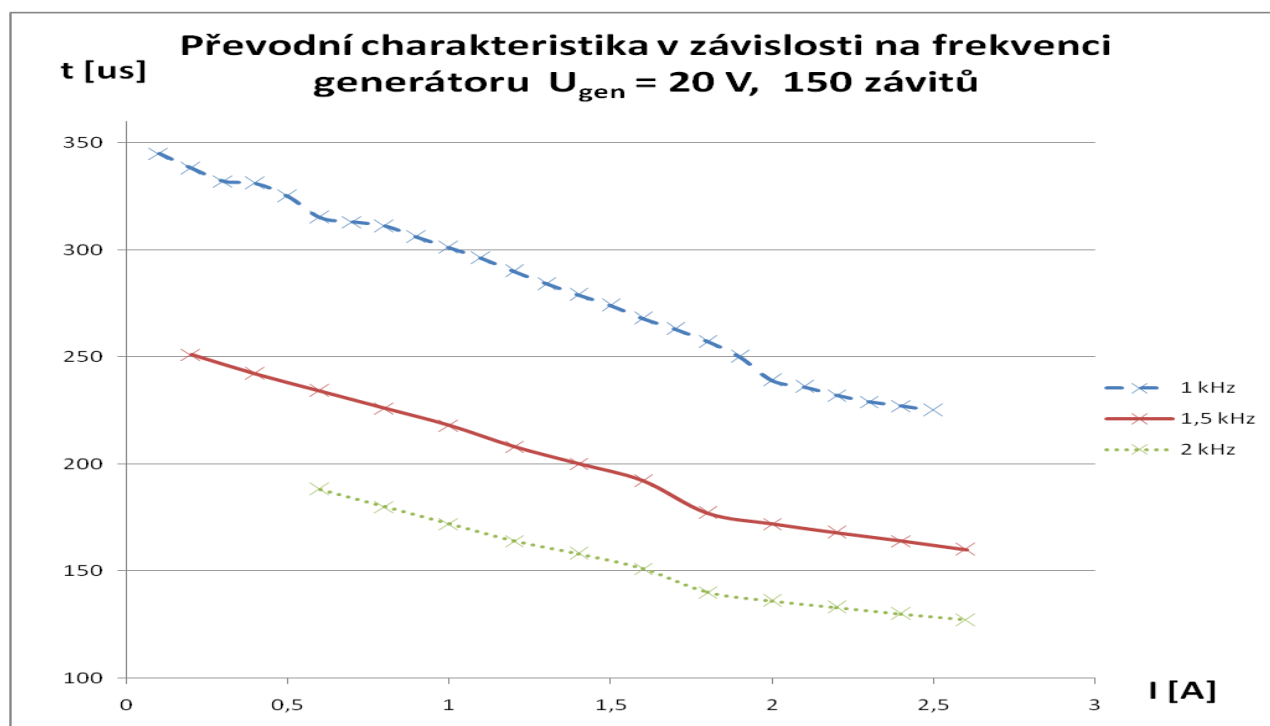


Obr. 6.8 Převodní charakteristika v závislosti na napětí generátoru

Převodní charakteristiky zalitého senzoru, které jsou na obrázku Obr. 6.7 a Obr. 6.8, se nijak výrazně neliší od převodních charakteristik nezalitého senzoru. Větší změny jsou patrné při nízkém napětí generátoru, hlavně při napětí 14 V a 12 V. Při napětí 20 V je zachována lineární část charakteristiky, která je nejvhodnější pro měření proudu.

Tab. 6.6 Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru

I [A]	U <sub>gen</sub> = 20 V		
	f = 1 kHz	f = 1,5 kHz	f = 2 kHz
0,2	338	251	203
0,4	331	242	194
0,6	315	234	188
0,8	311	226	180
1	301	218	172
1,2	290	208	164
1,4	279	200	158
1,6	268	192	151
1,8	257	177	140
2	239	172	136
2,2	232	168	133
2,4	227	164	130
2,6		160	127

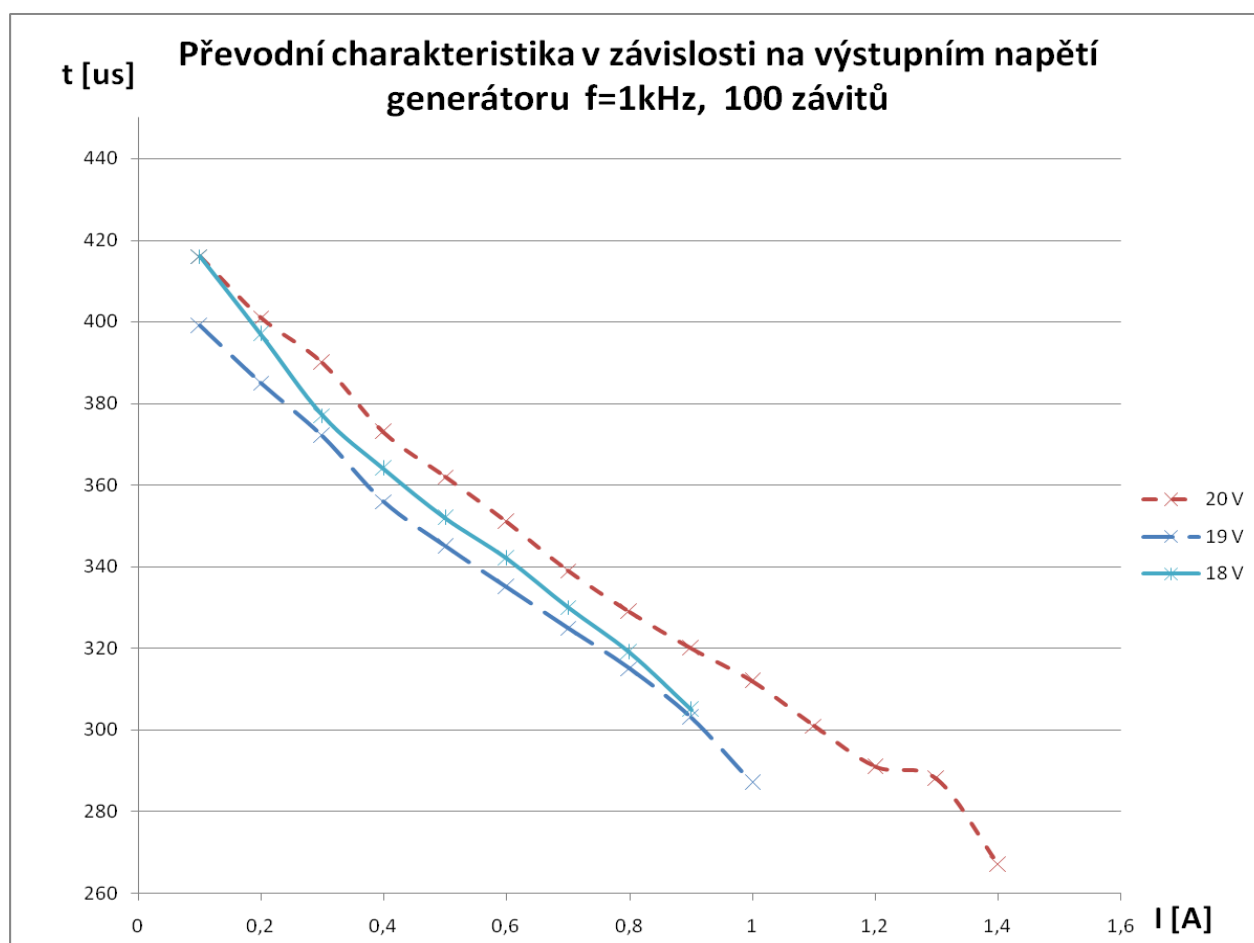


Obr. 6.9 Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci generátoru

Převodní charakteristika v závislosti na frekvenci zůstává po zalití stejná. Jednotlivé změny v závislosti na frekvenci jsou popsány pod obrázkem Obr. 6.3.

Tab. 6.7 Převodní charakteristika při 100 závitěch pomocné cívky

I [A]	U <sub>gen</sub> [V]		
	20	19	18
0,1	416	437	
0,2	401	413	430
0,3	390	399	416
0,4	373	385	397
0,5	362	372	377
0,6	351	356	364
0,7	339	345	352
0,8	329	335	342
0,9	320	325	330
1	312	315	319
1,1	301	303	305
1,2	291	287	
1,3	288		
1,4	267		



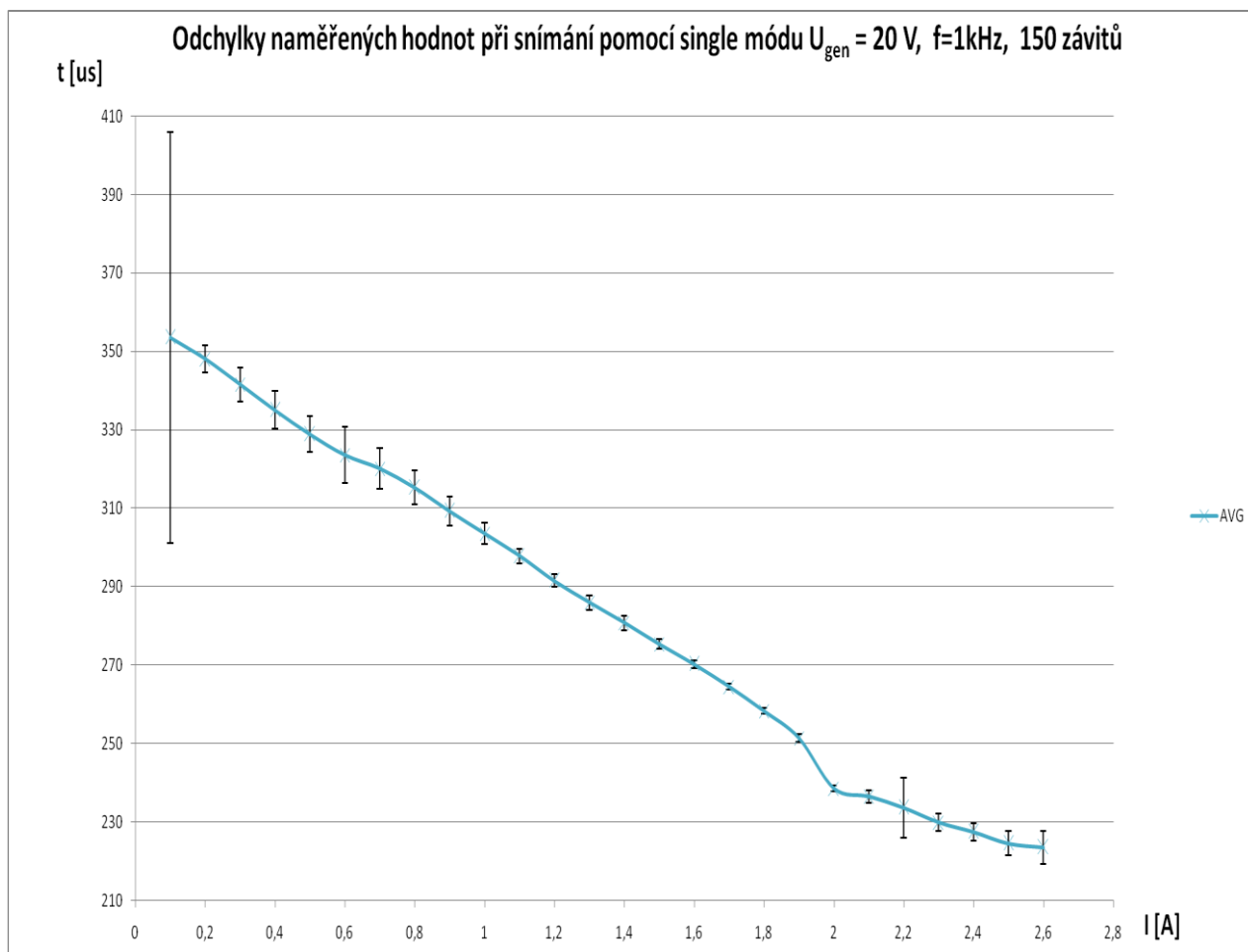
Obr. 6.10 Převodní charakteristika pro 100 závitů pomocné cívky

Po zalití senzoru došlo ke zlepšení linearitý převodní charakteristiky v oblasti nižších proudů od 0,1 A do 0,4 A. Větší nelinearita se projevila při napětí generátoru 20 V a měřeném proudu od 1,1 A do 1,4 A. Tyto hodnoty se změnily pouze pro měření s pomocnou cívkou se 100 závitů. Tato změna je způsobena mechanickou stabilizací senzoru zalitím.

Tab. 6.8 Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření

	jednotlivé měření									
I [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	356,4	355,7	356,4	355,3	343,2	356,4	357,5	356,5	354,9	343,1
0,2	347,6	348,6	347,6	348,2	347,7	347,8	348,1	348,5	348,3	347,8
0,3	341,6	341,2	341,6	342,7	341,1	341,4	341,4	341,3	341,8	341,6
0,4	334,8	334,9	334,9	334,7	336,2	335,5	335,3	334,3	335,2	335,2
0,5	329,3	328,3	328,9	328,4	329,5	328,7	329,2	328,2	329,2	329,4
0,6	323,5	322,8	323,2	323,4	323,3	322,8	324,8	324,2	322,9	324,7
0,7	320	320,4	319,5	320,3	319,6	319,4	320,4	320,4	321,2	320
0,8	315,3	314,8	315	315,5	316	315,5	315,9	315,6	315,1	314,6
0,9	309,4	308,8	309,3	309,9	309,5	309,4	308,9	308,9	309,9	309,3
1	303,6	303,7	304,2	303,4	303,5	303,3	303,1	303,6	303,6	303,6
1,1	297,9	298,1	297,7	297,7	298	297,4	297,8	297,7	297,8	297,9
1,2	291,7	291,7	291,2	291,5	291,7	291,7	291,4	291,5	291,5	291,7
1,3	286,1	285,9	286,2	285,9	285,6	286,2	285,9	285,9	286,2	286,1
1,4	280,9	280,7	280,7	281,3	280,7	280,7	280,8	280,8	280,8	280,6
1,5	275,6	275,3	275,4	275,3	275,4	275,5	275,3	275,4	275,3	275,1
1,6	270,3	270,3	270,2	270,1	270,4	270,4	270,3	270,2	270,2	270,4
1,7	264,4	264,6	264,6	264,5	264,6	264,6	264,6	264,6	264,4	264,5
1,8	258,3	258,4	258,3	258,5	258,4	258,3	258,3	258,4	258,3	258,3
1,9	251,3	251,6	251,5	251,4	251,4	251,5	251,6	251,4	251,4	251,4
2	238,6	238,6	238,6	238,6	238,8	238,5	238,6	238,5	238,6	238,6
2,1	236,5	236,7	236,6	236,3	236,4	236,4	236,6	236,8	236,7	236,3
2,2	234,4	234,1	234,3	234,4	234,2	234,2	233,2	232,2	232,8	232,9
2,3	229,8	229,7	229,6	230,2	230,4	229,9	229,8	230,1	229,9	230,1
2,4	227,3	227,7	227,6	228	227,3	227,5	227,4	227,7	227,8	227,4
2,5	225,3	224,5	224,3	224,4	224,8	224,5	224,8	224,5	224,8	224,2
2,6	223,6	223,3	223,9	223,3	223,7	223,3	224,3	223,7	222,6	223,7

Z obrázku Obr. 6.11 lze vidět, že po zalití senzoru došlo ke zmenšení odchylek v lineární i nelineární části, zejména pro větší proudy od 1,8 A do 2,6A. Odchyly jsou vztaženy k aritmetickému průměru deseti naměřených hodnot. Pro lepší názornost je jejich velikost vynásobena deseti. Odchyly jsou vypočítány jako nejistota měření typu A podle vzorců (6.1) a (6.2). Mechanickou stabilizací došlo ke zmenšení odchylek. Z vypočtených odchylek byla vypočítána pro lineární část převodní charakteristiky zalitého senzoru, od 0,8 A do 1,9 A, třída přesnosti měřícího senzoru. Přesnost je 0,80 %, což odpovídá třídě přesnosti 0,8.



Obr. 6.11 Odchylky naměřených hodnot

Tab. 6.9 Naměřené hodnoty převodní charakteristiky v závislosti na počtu závitů měřicí cívky

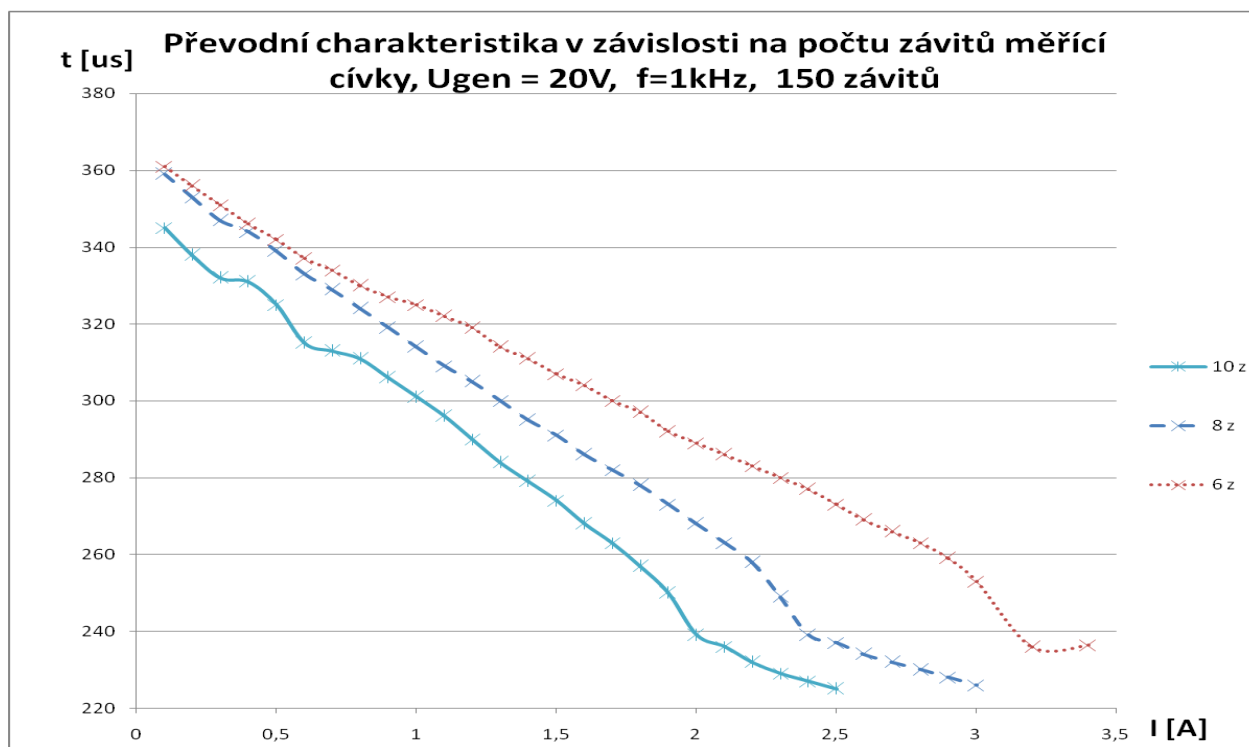
Počet závitů měřicí cívky									
$I$ [A]	10 z	8 z	6 z	$I$ [A]	4 z	2 z		$I$ [A]	1 z
0,1	345	359	361	0,2	364,7	364,4		0,5	368,9
0,2	338	353	356	0,4	358,6	362,7		1	365
0,3	332	347	351	0,6	353,6	360,5		1,5	360
0,4	331	344	346	0,8	347,4	357,2		2	357,9
0,5	325	339	342	1	342,4	354,2		2,5	353
0,6	315	333	337	1,2	339	352,5		3	349,7
0,7	313	329	334	1,4	332,3	352		3,5	345,9
0,8	311	324	330	1,6	327,8	349,6		4	343,3
0,9	306	319	327	1,8	324,7	346,7		4,5	339,8
1	301	314	325	2	319,6	343,6		5	337,4
1,1	296	309	322	2,2	314,3	342		5,5	335,9
1,2	290	305	319	2,4	309,4	341,4		6	333,8
1,3	284	300	314	2,6	304,4	337,7		6,5	329,8
1,4	279	295	311	2,8	299,4	335		7	327



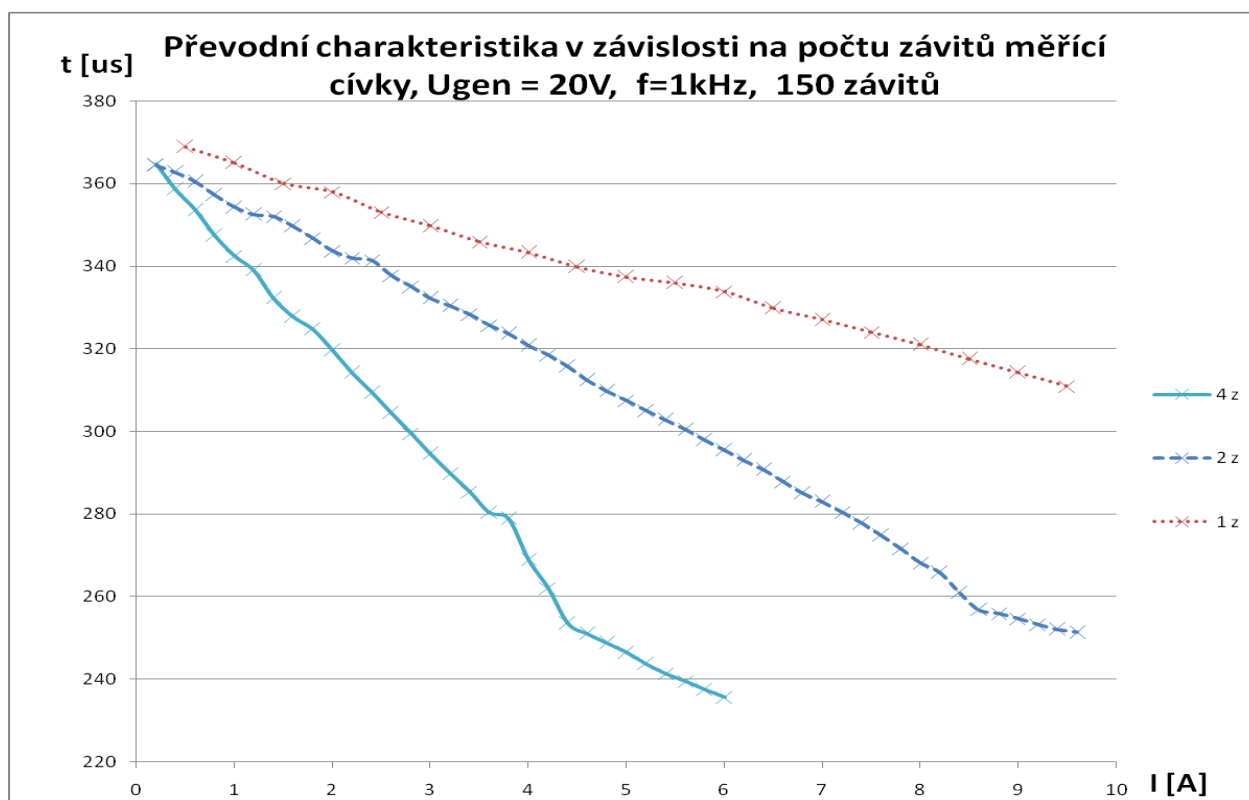
	Počet závitů měřicí cívky									
I [A]	10 z	8 z	6 z		I [A]	4 z	2 z		I [A]	1 z
1,5	274	291	307		3	294,6	332,3		7,5	324
1,6	268	286	304		3,2	289,8	330,4		8	321
1,7	263	282	300		3,4	285,3	328,3		8,5	317,5
1,8	257	278	297		3,6	280,3	325,6		9	314,3
1,9	250	273	292		3,8	278,9	323,7		9,5	310,9
2	239	268	289		4	268,9	320,8			
2,1	236	263	286		4,2	262	318,5			
2,2	232	258	283		4,4	253,5	315,7			
2,3	229	249	280		4,6	251	312,4			
2,4	227	239	277		4,8	248,8	309,8			
2,5	225	237	273		5	246,4	307,4			
2,6		234	269		5,2	243,7	304,9			
2,7		232	266		5,4	241,3	302,8			
2,8		230	263		5,6	239,5	300,4			
2,9		228	259		5,8	237,4	297,9			
3		226	253		6	235,6	295,4			
3,2			235,9		6,2		293			
3,4			236,4		6,4		290,7			
					6,6		287,8			
					6,8		285			
					7		283			
					7,2		280,4			
					7,4		277,7			
					7,6		274,8			
					7,8		271,6			
					8		268,1			
					8,2		265,8			
					8,4		260,9			
					8,6		256,8			
					8,8		255,9			
					9		254,6			
					9,2		253,2			
					9,4		252,1			
					9,6		251,3			

V tabulce Tab. 6.9 jsou uvedeny naměřené hodnoty převodní charakteristiky v závislosti na počtu závitů měřicí cívky. Na obrázku Obr. 6.12 a Obr. 6.13 je zobrazeno, jak se posunuje lineární část převodní charakteristiky v závislosti na počtu závitů měřicí cívky. Tímto byla ověřena teorie, že změnou počtu závitů dojde ke změnění měřicího rozsahu. Převodní charakteristika pro jeden závit měřicí cívky byla změřena s větším proudovým krokem z důvodu velkého zatížení rezistoru simulujícího reálnou zátěž. Tento měřicí rozsah nebyl kompletně změřen z důvodu dosažení maximálního proudu zdroje 9,6 A. Tento rozsah by pravděpodobně pracoval až do proudu 20 A.

Z tohoto měření vyplývá, že zalití senzoru nemělo negativní vliv na převodní charakteristiku. Došlo ke zmenšení odchylek naměřených hodnot a větší mechanické odolnosti senzoru.



Obr. 6.12 Převodní charakteristika v závislosti na počtu závitů měřící cívky



Obr. 6.13 Převodní charakteristika v závislosti na počtu závitů měřící cívky

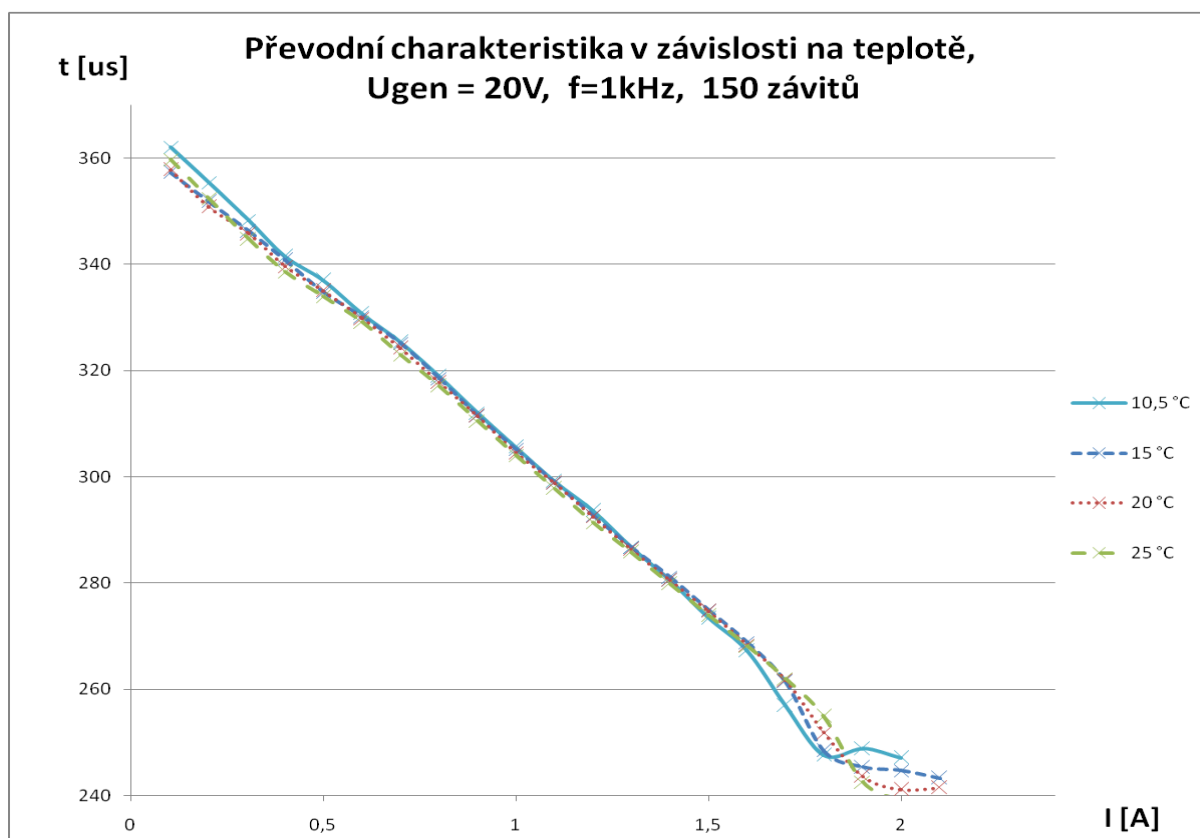
## 7 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST OBVODU

V této kapitole je popsán způsob měření teplotní závislosti kompletního obvodu a naměřené výsledky.

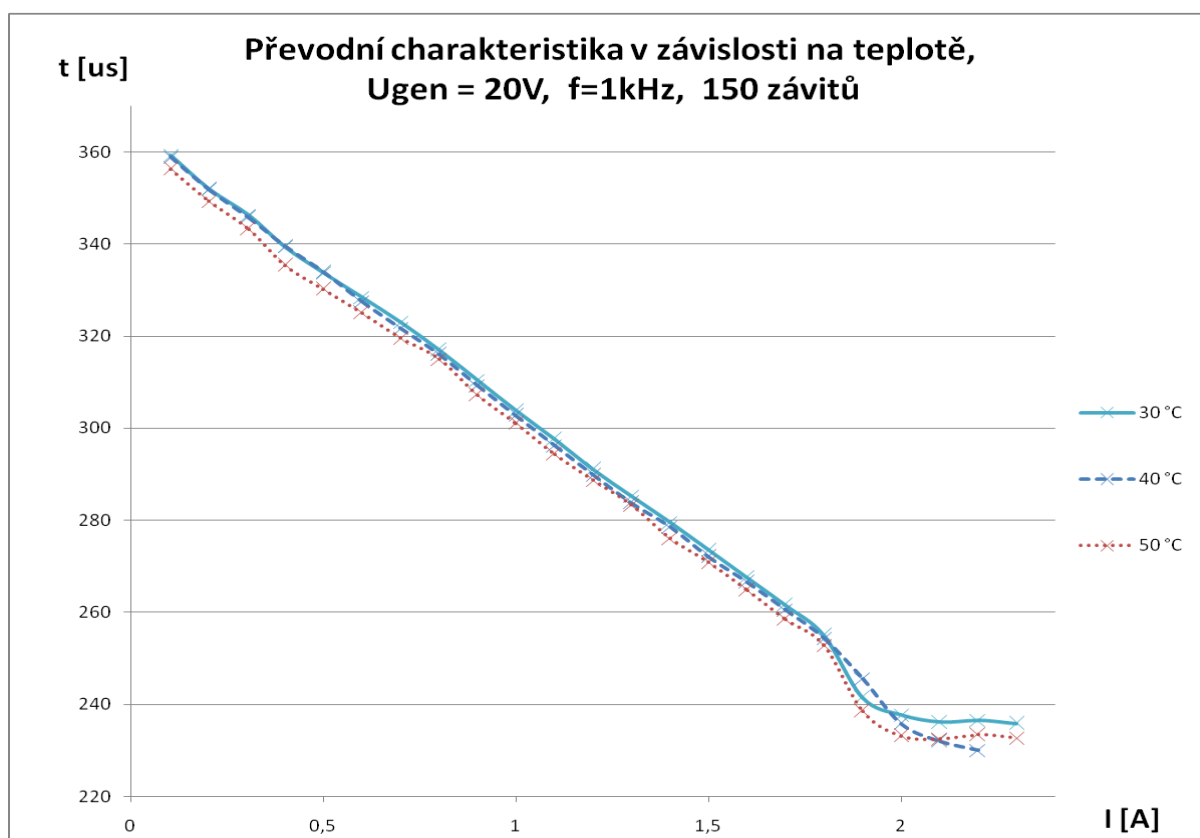
Teplotní závislost byla měřena v termoboxu, který byl chlazen nebo vyhříván pomocí peltierova článku. Kompletní obvod byl umístěn do termoboxu a po dosažení požadované teploty vzduchu v termoboxu byl senzor ponechán 15 minut v klidu pro vyrovnání teploty na teplotu okolního vzduchu v termoboxu, poté byla změřena převodní charakteristika. Do pomocné cívky byl přiveden harmonický signál s frekvencí 1 kHz a napětím 20 Vpp. Počet závitů pomocné cívky byl 150 závitů a měřicí cívky 10 závitů. Teplotní závislost byla změřena pro vybrané hodnoty v rozmezí od 10,5 °C do 50 °C. Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 7.1 a graficky znázorněny na obrázku Obr. 7.1 a Obr. 7.2 .

Tab. 7.1 Naměřené hodnoty teplotní závislosti

	teplota [°C]						
I [A]	10,5	15	20	25	30	40	50
0,1	362	357,3	357,8	359,7	359,3	358,9	256,3
0,2	355,4	351,8	350,8	352,4	352	351,9	349,3
0,3	348,2	346,2	345,7	344,7	346,2	345,7	343,2
0,4	341,5	340,8	339,6	338,6	339,4	339,5	335,4
0,5	337	334,8	335	333,9	333,8	333,9	330,2
0,6	330,7	330,1	329,8	329,1	328,4	327,4	325
0,7	325,4	325,1	324,2	323	323	321,7	319,56
0,8	318,9	318,5	317,7	317,1	317	316	315
0,9	312	311,5	311,4	310,5	310,4	309,2	307,2
1	305,6	305,2	304,5	304	303,8	302,8	301,1
1,1	299,1	298,9	298,8	297,8	297,6	296,2	294,3
1,2	293,6	292,7	292,5	291,4	291,1	289,8	288,7
1,3	286,7	286,7	286,3	285,8	285,2	283,8	283,3
1,4	280,5	281,1	280,5	279,8	279,5	278,5	276
1,5	273,4	274,9	274,7	273,9	273,5	272,1	270,8
1,6	267,2	268,8	268,3	268,1	267,5	266,5	264,8
1,7	256,9	261,4	261,6	262	261,5	260,5	258,5
1,8	247,6	248,4	251,8	254,9	255	254,4	252,8
1,9	248,8	245,3	243,6	242,5	241,4	245,5	238,5
2	247,1	244,7	241,1	239,2	237,7	235,8	233,2
2,1		243,3	241,4	238,1	236,1	232	232,5
2,2				238	236,5	230	233,4
2,3					235,8		232,7



Obr. 7.1 Převodní charakteristika v závislosti na teplotě



Obr. 7.2 Převodní charakteristika v závislosti na teplotě

Z naměřených hodnot vyplývá že senzor je v lineární části velmi málo závislý na teplotě. Mimo lineární část je tato závislost vyšší. Hlavní vliv na teplotní závislost má wiegandův senzor umístěný ve vzduchové mezeře jádra, protože v magnetickém obvodu představuje hlavní část celkového odporu jádra a vzduchové mezery. Větší teplotní závislost se projeví při vyšších teplotách okolo 50 °C.

Teplotní závislost pro proud 1,4 A a pro rozmezí teplot 20 až 30 °C je 0,1 μs/°C, to je 0,035 % z naměřené hodnoty. Pro stejný proud a rozsah teplot 30 až 50 °C je teplotní závislost 0,35 μs/°C, to je 0,125 %.

## 8 ZÁVĚR

Při řešení problematiky bezkontaktního měření proudu pomocí senzoru pracujícím na principu Wiegandova efektu byly změřeny převodní charakteristiky pro měření stejnosměrného proudu, pro střídavý proud byla ověřena pouze funkčnost návrhu. Z naměřených hodnoty vyplývá že tento senzor je vhodný pro měření střídavých a stejnosměrných proudů. Senzor je při měření stejnosměrných proudů závislý na frekvenci generátoru harmonického signálu, který je přiveden na pomocnou cívku. Frekvence generátoru se pro správnou funkci senzoru musí pohybovat v rozmezí od 500 Hz do 2 kHz. Při měření střídavých proudů byl změřen pouze proud se síťovým kmitočtem, tedy 50 Hz. Funkčnost návrhu pro měření střídavých proudů byla ověřena při tomto měření. Třída přesnosti zalitého měřícího senzoru, při měření stejnosměrného proudu, byla 0,8. Tato hodnota je srovnatelná s přesnými měřicími přístroji. Teplotní závislost zalitého senzoru byla malá pro rozsah teplot 20 °C až 30 °C. Její hodnota byla 0,035% z naměřené hodnoty. Pro rozmezí teplot 30 °C až 50 °C teplotní závislost vzrostla na hodnotu 0,125% z naměřené hodnoty. Hodnoty teplotní závislosti vztažené k naměřené hodnotě jsou závislé na velikosti proudu. Tyto hodnoty byly naměřeny při proudu 1,4 A. Změnou počtu závitů měřící cívky bylo dosaženo změny měřícího rozsahu. Z naměřených hodnot vyplývá, že lze tímto způsobem měřit stejnosměrné proudy do 20 A. Z důvodu výkonového omezení DC zdroje byla charakteristika změřena do maximální hodnoty proud 9,6 A. Pro všechna měření je nejvhodnější využít lineární část převodní charakteristiky.

# LITERATURA

- [1] Hallova sonda: Hallův senzor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 25.3.2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Hallova\\_sonda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Hallova_sonda)
- [2] VOJÁČEK, Antonín. Měření a regulace: Fluxgate senzory. *Automatizace.hw.cz* [online]. 6. Srpen 2006 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006080601>
- [3] KAŠPAR, Petr. *Měření slabých magnetických polí a jejich stínění: Feromagnetické magnetorezistory* [online]. 2005, 51 s. Praha 2013 [cit. 03.12.2013]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38MAP/mereni\\_a\\_stineni\\_sl\\_poli.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38MAP/mereni_a_stineni_sl_poli.pdf)
- [4] VYHNÁNEK, Jan. *Minohledačka s AMR gradiometry* [online]. Praha, 2011 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne\\_prace/DP\\_2011\\_Vyhnaelek\\_looked.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DP_2011_Vyhnaelek_looked.pdf). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Janošek.
- [5] Beijing Tianlong Control System Ltd. BEIJING TIANLONG CONTROL SYSTEM LTD. *Beijing Tianlong Control System Ltd.* [online]. 29F1#ShiJijiaYuan ChaoYang District BeiJing, 2010 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.tcs-access.com/sensor/english/4122100-A.htm>
- [6] MOHRI, K, TAKAMIDO, H. Large barkhausen effect of 6.3 % SiFe single crystal wire. *Ieee transactions on magnetics*, September, 1990, VOL. 26, NO. 5, *Department of Electrical Engineering Nagoya University, Nagoya 464-01, Japan.* [cit. 2013-12-10].
- [7] MOHRI, K, OKAMURA, K, YAMASAKI, J. Jitter-less pulse generator elements using amorphous bistable wires. *Ieee transactions on magnetics*, VOL. MAG-20, NO. 5, September 1984. [cit. 2013-12-10].
- [8] RADELOFF, C, RAUSCHER, G, Pulse generation with short composite wires, *iee transactions on magnetics*, VOL. MAG-21, NO. 5, September 1985. [cit. 2013-12-10].
- [9] BEJČEK, L., ČEJKA, M., REZ, J.. *Měření v elektrotechnice*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006. [online]. [cit. 03.12.2013]. Dostupné z: [http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni\\_v\\_elektrotechnice.pdf](http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni_v_elektrotechnice.pdf)
- [10] TYRBACH, Jaromír. Bočník ampérmetru. SPŠ SAE ÚSTÍ N. L. *Bočník ampérmetru* [online]. 2009 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://web.telecom.cz/tyrbach/bocnik.pdf>